

TILLÄMPBARHETEN AV EN HELIKOPTERBUREN TRANSIENT ELEKTROMAGNETISK METOD FÖR ATT AVGRÄNSA DEPONIER

EN FALLSTUDIE AV TORPADEPONIN

Fanny Ekström
Tobias Möhl

Degree of Bachelor of Science
with a major in Earth Sciences
15 hec

Department of Earth Sciences
University of Gothenburg
2019 B-1062

Faculty of Science



UNIVERSITY OF GOTHENBURG

TILLÄMPBARHETEN AV EN HELIKOPTERBUREN TRANSIENT ELEKTROMAGNETISK METOD FÖR ATT AVGRÄNSA DEPONIER

EN FALLSTUDIE AV TORPADEPONIN

Fanny Ekström
Tobias Möhl

ISSN 1400-3821

B1062
Bachelor of Science thesis
Göteborg 2019

Mailing address
Geovetarcentrum
S 405 30 Göteborg

Address
Geovetarcentrum
Guldhedsgatan 5A

Telephone
031-786 19 56

Geovetarcentrum
Göteborg University
S-405 30 Göteborg
SWEDEN

Sammanfattning

En heltäckande nationell sammanställning saknas över nedlagda deponier i Sverige. Det totala antalet anläggningar uppskattas till flera tusen. Den geografiska utbredningen av dessa deponier är ofta okänd och de kan påverka sin omgivning även om de har varit nedlagda under en mycket lång tid. Denna studie undersöker möjligheten att använda en flygburen transient elektromagnetisk mätteknik som avgränsningsmetod för deponier. För att testa dess tillämpbarhet som avgränsningsmetod utfördes traditionella markbundna geofysiska undersökningar på Torpadeponin i Trollhättans kommun. Resistivitets- och inducerad polarisationsmätning gjordes för att möjliggöra jämförelser mot flygburen transient elektromagnetisk data, laboratorieanalyser och arkivmaterial. I denna studie bedöms de flygburna mätningarna ha för låg upplösning för att kunna avgränsa Torpadeponin, på grund av deponins storlek och jordlagerföljden i området. Dock kan lakvattenplymen från deponin ses med de flygburna mätningarna, men då vattnets resistivitet överlappar den omgivande lerans resistivitet är det svårt att urskilja dem ifrån varandra. Vidare visar analyser av lakvattnet på generellt låga koncentrationer av metaller och föroreningar. För att se en deponi med flygburen transient elektromagnetisk mätning krävs en större deponi, eller en deponi där både de deponerade massorna och lakvattnet visar på resistivitetskontraster gentemot omgivande mark. Ytterligare alternativ är att minska mätinstrumentets storlek för att möjliggöra registrering av små strukturer.

Nyckelord: Torpa 3:34, deponi, flygburen transient elektromagnetism, SkyTEM, resistivitet, inducerad polarisation, lakvatten, Res2DInv, GIS

Abstract

A comprehensive national compilation of closed landfills in Sweden is missing. The total amount of landfill sites is estimated to be several thousands. The geographical extension of these landfills is often unknown, and they can affect their environment even if they have been closed for many years. This study investigates the possibility to use airborne transient electromagnetic surveys to delineate landfills. To test its applicability as a delineation method for landfills, traditional ground-based geophysical investigations were carried out at Torpa landfill in Trollhättan municipality. Resistivity and induced polarization were measured to enable the comparison to airborne transient electromagnetics, laboratory analyses and archive studies. This study considered the resolution of the airborne survey to be too low to delineate the Torpa landfill, because of the size of the landfill and the stratigraphy of the soil in the area. However, a plume of leachate water from the landfill can be seen with the airborne survey, but since the resistivity of the water overlaps the resistivity of the surrounding clay, is it hard to distinguish them from each other. Furthermore, analyses of the leachate water show that the concentrations of metals and contaminants are generally low. To see a landfill with airborne transient electromagnetics, a larger landfill is required, or a landfill where both the deposited waste and leachate water shows a large contrast in resistivity from its surroundings. Further alternatives are to decrease the size of the measuring instrument to enable registration of small structures.

Keywords: Torpa 3:34, landfill, airborne transient electromagnetics, SkyTEM, resistivity, induced polarization, leachate water, Res2DInv, GIS

Innehållsförteckning

1	Introduktion.....	1
1.1	Bakgrund.....	2
1.1.1	Deponier.....	2
1.1.2	Geofysiska mätningar.....	2
1.1.2.1	Resistivitet.....	2
1.1.2.2	Inducerad polarisation.....	4
1.1.2.3	Helikopterburen transient elektromagnetism.....	4
1.1.2.4	SkyTEM.....	4
1.2	Områdesbeskrivning.....	5
1.2.1	Göta älvmrådet.....	5
1.2.2	Torpadeponin.....	5
2	Metod.....	8
2.1	Fältmätningar.....	8
2.1.1	Resistivitet och inducerad polarisation.....	8
2.1.2	Avvägning.....	10
2.1.3	Lakvattenmätningar.....	10
2.2	Databearbetning.....	11
2.2.1	Resistivitet och inducerad polarisation.....	11
2.2.2	Helikopterburen transient elektromagnetism.....	11
2.2.3	Kartor.....	12
3	Resultat.....	12
3.1	Resistivitet och inducerad polarisation.....	12
3.1.1	Linje 1.....	12
3.1.2	Linje 2.....	13
3.1.3	Linje 3.....	14
3.2	Lakvattenmätningar.....	15
3.3	Helikopterburen transient elektromagnetism.....	18
3.3.1	Helikopterburen transient elektromagnetism jämfört mot markmätningar.....	20
4	Diskussion.....	21
4.1	Resistivitet och inducerad polarisation.....	21
4.2	Lakvattenmätningar.....	22
4.3	Helikopterburen transient elektromagnetism.....	23
4.3.1	Helikopterburen transient elektromagnetism jämfört mot markmätningar.....	23
5	Slutsats.....	24
	Tack.....	25
	Referenser.....	26
	Referenser GIS-data.....	28
	Bilaga 1.....	29

1 Introduktion

Målsättningen med föreliggande rapport är att beskriva hur väl helikopterburen transient elektromagnetisk mätteknik kan användas för att avgränsa deponier. I dagsläget avgränsas deponier med hjälp av markbundna geofysiska undersökningar som komplement till borrhning och provtagning (Dahlin, Rosqvist & Leroux 2010). De geofysiska undersökningar som används är till exempel elektrisk resistivitet, inducerad polarisation, markradar, seismisk refraktion och elektromagnetism (Dahlin m.fl., 2010; Hite, 2003). Dessa metoder kräver fältarbete och kan därför vara tidskrävande. Flygburna mätningar skulle kunna ersätta, komplettera eller effektivisera de mer etablerade metoderna.

För att testa tillämpbarheten av helikopterburen transient elektromagnetisk mätteknik för avgränsning av deponier utfördes markbundna undersökningar på Torpadeponin i Trollhättans kommun. Resistivitets- och inducerad polarisationsmätning gjordes för att möjliggöra jämförelser mot data från flygburna mätningar, laboratorieanalyser och arkivmaterial.

Studieområdet valdes med avseende på att uppfylla följande kriterier: a) Befintliga helikopterburna transienta elektromagnetiska mätningar ska ha gjorts i ett område som sammanfaller med en tidigare undersökt nedlagd deponi och b) ligga inom en 10-milsradie från Göteborg. Utifrån dessa krav valdes Torpadeponin som är placerad på fastigheten Torpa 3:34 i Trollhättans kommun norr om Lilla Edet (Figur 1). Deponin är belägen strax norr om Slumpåns mynning i Göta älv. Detta är ett av de mest skreddrabbade områdena i Sverige (Göransson, Bendz & Larson, 2008). Göta älv rinner från Vänern ned till Göteborg och förser cirka 700 000 personer med dricksvatten (Göta älvs vattenvårdsförbund, 2015). Älven har en hög föroreningsbelastning och är ett av de mest prioriterade områdena i Västra Götaland att skydda (Ramböll, 2008). Ett skred innefattande

Torpadeponin skulle öka den redan höga föroreningsbelastningen på Göta älv.

Målet med denna studie är att svara på följande frågeställningar:

- ❖ Kan Torpadeponin avgränsas med flygburna mätningar?
- ❖ Hur skiljer sig flygmätningar från markmätningar?
- ❖ Kan lakvatten ses från markmätningar och flygmätningar?
- ❖ Har lakvatteninnehållet förändrats från tidigare mätningar?
- ❖ Kan innehållet i deponin avslöjas med lakvattenmätningar?
- ❖ Skulle ett annat resultat fås ifall flygmätningen utfördes över en annan deponi eller med ett annat mätinstrument?



Figur 1 – Översiktskarta som visar Torpadeponins läge mellan Trollhättan och Göteborg. För GIS-datakällor, se avsnitt Referenser GIS-data.

1.1 Bakgrund

1.1.1 Deponier

Länsstyrelserna har uppdraget att producera kartor över förorenade och potentiellt förorenade områden. För deponier saknas dock en heltäckande nationell sammanställning och bedömning av deras miljörisker (SGI, 2018). Utsträckningen av deponier är dessutom ofta okänd (Dahlin m.fl., 2010). Antalet nedlagda deponier i Sverige är uppskattat till flera tusen. Dessa kan fortfarande påverka sin omgivning även om de har varit nedlagda under en mycket lång tid. För att minimera deras påverkan täcks deponierna vanligtvis med flera olika lager bestående av utjämningskikt, tätskikt, dräneringskikt och skyddsskikt, så att endast en begränsad mängd lakvatten läcker ut (SGI, 2018). För äldre deponier är dokumentationen dock ofta bristfällig för hur välfungerande täckningen är (Dahlin m.fl., 2010).

Det vatten som finns i eller som har runnit igenom en deponi kallas för lakvatten. Det bildas då vatten från nederbörd (i äldre deponier även från grundvatten) infiltrerar deponin, eller när vatten i avfallet pressas ut på grund av ovanliggande last. Det är endast en liten del av alla föroreningar i lakvatten som mäts då det ofta är svårt att analysera alla föroreningar på grund av deras komplexitet (Naturvårdsverket, 2008) och för att de kan ha väldigt olika effekter på miljön (Öman, Malmberg & Wolf-Watz, 2000). Detta leder till en bristande kunskap i vad som sker med dessa föroreningar när lakvattnet sprids ut i den omgivande miljön och hur detta påverkar människors hälsa. Utsläppen är vanligtvis begränsade, men i och med det farliga avfall som kan finnas i deponier utgör de långsiktiga konsekvenserna en potentiellt stor risk. En del miljögifter som finns i lakvatten kan vara akuttoxiska för vissa organismer (Naturvårdsverket, 2008). Det är därför viktigt att ha kontroll över dessa nedlagda deponier, för även om de är sluttäckta finns alla föroreningar fortfarande kvar undertill. En nationell sammanställning måste finnas för att tillsynsmyndigheten och allmänheten ska kunna veta var dessa deponier finns och vilka

arbeten som kan utföras i deras närhet utan tillförda konsekvenser (SGI, 2018).

1.1.2 Geofysiska mätningar

För att undersöka och avgränsa deponier har användningen av resistivitmätningar tillsammans med inducerad polarisation visat sig vara mycket bra metoder (Illiceto & Morelli, 1999; Carlson, Hare & Zonge, 2001; Leroux, Dahlin & Svensson, 2007, refererad i Dahlin m.fl., 2010). Geofysiska undersökningar är nödvändiga då metoder som borrhning och provtagning inte är tillräckliga för att få en heltäckande bild av en deponi. Resistivitmätningar är en välanvänd metod för att undersöka förekomsten av grundvatten och förorenad mark, men kan många gånger inte användas ensamt för att avgränsa deponier då variationen av vattenmängden i marken ger stora variationer i resistivitet. Istället kan inducerad polarisation avgränsa deponier då mycket av det avfall som finns i marken en uppladdningsbarhet som visar var avfallet är beläget (Dahlin m.fl., 2010).

1.1.2.1 Resistivitet

Markens resistivitet kan mätas genom att elektrisk ström induceras i marken via nedstoppade elektroder utsatta längs med kablar kopplat till ett mätinstrument (Mussett & Khan, 2000 s. 185 & 198). Strömmen tar den enklaste vägen genom marken mellan elektroderna och kommer vara som mest koncentrerad vid ytan. Dock kommer inte strömmen enbart färdas vid ytan då denna utgör ett tunt lager och detta tunna lager har en högre resistivitet än ett mäktigare lager. Strömmen penetrerar också nedåt och åt sidorna i en bananformad bana mellan elektroderna och byter håll några gånger per sekund för att inte ansamlas vid elektroderna (s.185 & 187). Hur djupt strömmen når beror delvis på resistivitetsskillnaderna mellan marklagren men också på hur långt elektroderna sitter från varandra, då ett längre elektrodavstånd leder strömmen längre ned men med lägre upplösning som konsekvens (s. 194 & 198).

Resistiviteten är beroende av resistansen (R) som fås från Ohms lag där potentialen (V) divideras med strömmen (I):

Ekvation 1

$$R = \frac{V}{I}$$

Resistansen har enheten ohm (Ω). Enheten för resistivitet bildas från produkten av resistansen och arean dividerat med en längd, vilket ger enheten ohm-meter (Ωm) (Reynolds, 1997 s.420).

Enligt Reynolds (s. 418) kan resistivitet (ρ) visualiseras som en kub som har en längd (L) och en tvärsnittsarea (A) där en ström (I) passerar. Då materialet har ett motstånd blir det en skillnad mellan den ström som förs in och den ström som förs ut. Detta kallas för potentialskillnad, eller spänning (V). Ekvationen för resistivitet blir följande:

Ekvation 2

$$\rho = \frac{VA}{IL}$$

Vidare förklarar Reynolds (s. 419) att ifall kuben skulle bestå av två olika material som har olika resistivitet skulle detta innebära att storleken och formen på dessa två material har en inverkan på potentialskillnaden och därmed på resistiviteten av kuben. Mussett och Khan (2000 s. 187) förklarar att om marken som undersöks består av olika material blir den uppmätta resistiviteten (*apparent resistivity*) det värde som marken skulle ha ifall den var homogen. Resistiviteten för olika material presenteras i *Tabell 1* som är sammanställd efter olika författare.

Tabell 1- Visar resistiviteten i Ωm hos olika material, värdena varierar från 0,2 – 1 000 000 Ωm . Värdena är inhämtade från Loke, 2004; Reynolds, 1997 s.422–423; Hack, 2000; Mussett & Khan, 2000 s.183; Jeppson, 2012 refererad i Ljungdahl, J & Bouvier, V

Material	Resistivitet [Ωm]
Granit	300–1 000 000
Vittrad granit	30–500
Lera	1–100
Sand	500–5000
Grus	100–5000
Morän	10–500
Hushållsavfall	10–50
Byggnadsavfall	30–300
Industriavfall	1–1000
Naturligt vatten	1–1000
Avrinning från deponi	<10–50
Lakvatten	0,9–5

Genom att invertera resistiviteten (ρ) fås konduktiviteten (σ):

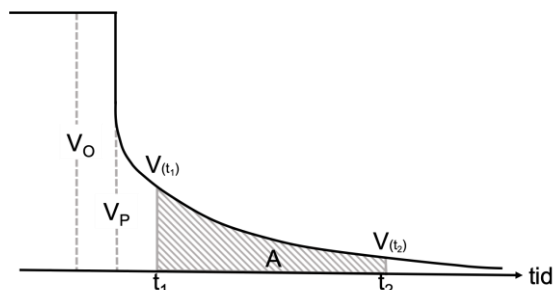
Ekvation 3

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

vilken har enheten Siemens/meter (S/m). Enheten kan också uttryckas som mho/meter ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$) (Reynolds, 1997 s.419). Markens elektriska konduktivitet beror i huvudsak på porvätskan och lerinnehållet. Mark som inte är vattenmättad ger en låg elektrisk konduktivitet medan lakvatten från deponier och lösta oorganiska föreningar i saltlösningar ger en högre konduktivitet (Mondelli, Giacheti, Boscov, Elis & Hamada, 2007). Konduktiviteten kan skilja sig mycket mellan olika deponier då en del kan vara väldigt konduktiva medan andra kan ha en lägre konduktivitet och därmed en högre resistivitet. (Reynolds, 1997 s. 478).

1.1.2.2 Inducerad polarisation

Med samma utrustning och uppställning som för mätning av resistivitet kan också den inducerade polarisationen i marken mätas. Detta är den avklingande spänningen som uppkommer när den nedförda strömmen i marken stängs av (Gazoty m.fl., 2012). Den inducerade polarisationen kan mätas genom att dividera den avklingande resterande spänningen (V_P) med den totala observerade spänningen (V_O). Den totala spänningen är den faktiska spänningen plus den polariserade spänningen som uppkommer av de polariserade processerna. Denna kvot ger markens uppladdningsbarhet (M) med enheten millivolt per volt (mV/V). Det är dock svårt att mäta den resterande spänningen direkt då strömmen stängs av. Istället mäts hur den resterande spänningen klingar av i tidsintervall (t_1, t_2, \dots, t_n). Dessa värden kan visualiseras som en area (A) under en kurva (Figur 2), där arean sedan kan divideras med den observerade spänningen. Då fås den uppmätta uppladdningsbarheten (*apparent chargeability*) (M_a) i enheten millisekunder (Reynolds, 1997 s. 529).



Figur 2 - Egenkonstruerad figur med inspiration från förlaga av Reynolds (1997 s.530). Arealen (A) representerar den avklingande spänningen mellan tidsintervallen t_1 och t_2 efter att strömmen stängts av. Vid dessa tidsintervall har spänningen avklingat till $V(t_1)$ respektive $V(t_2)$. V_o representerar den totala observerade spänningen och V_p representerar den avklingande resterande spänningen.

Reynolds (s. 531) beskriver den uppmätta uppladdningsbarheten med ekvationen:

Ekvation 4

$$M_a = \frac{1}{V_O} \int_{t_1}^{t_2} V_P(t) dt = \frac{A}{V_O}$$

1.1.2.3 Helikopterburen transient elektromagnetism

En transient elektromagnetisk mätning (TEM) är en geofysisk metod där en kraftig ström skickas ut i en spole för att sedan tillfälligt slås av. När strömmen slås av induceras en ström i marken som utbreder sig nedåt och utåt och orsakar ett magnetiskt fält. Det magnetiska fältets storlek och avklingningshastighet är beroende av markens ledningsförmåga. En mottagarspole registrerar detta magnetfält och visar en svag signal där marken har en hög resistivitet och en starkare signal där marken har en låg resistivitet (Löfroth m.fl., 2018).

1.1.2.4 SkyTEM

Helikopterburna TEM-mätningar, kallat SkyTEM, har utvecklats i Danmark för att kartlägga förekomster av grundvatten (Sørensen och Auken, 2004). Då monteras en sändarram försedd med mottagarspoler under en helikopter som flyger på 30–50 meters höjd (Figur 3). Kostnaden för denna metod är högre än för markbundna mätningar men ett större område kan täckas på kortare tid. Det är dock inte tillåtet att flyga över bebyggelse och trafikerade vägar samt att störningar uppkommer i datan från kraftledningar, järnvägar och liknande. Dessa störningar tas bort inom en zon av 100 meter (Löfroth m.fl., 2018).



Figur 3 - Bild på SkyTEM i användning (Foto: SGI, Löfroth m.fl., 2018).

Flygmätningar med SkyTEM utfördes i augusti 2015 på uppdrag av Löfroth m.fl. (2018) för att undersöka förekomsten av kvicklera längs Göta älv. Ett av områdena som undersöktes var Slumpåns dalgång. Avståndet mellan flyglinjerna var 75 meter och ett mätsystem som gav hög upplösning de översta 50 meterna i marken användes med konsekvensen att djupkänningen blev sämre. Löfroth m.fl. (2018) menar att dessa undersökningar visar att SkyTEM ger ett nästan lika bra resultat som resistivitetsmätningar gjorda på marken och att det även har ett större djupseende. Den insamlade datan bearbetades av Löfroth m.fl. (2018) till en resistivitetsmodell med hjälp av en inversionsteknik där marken antas vara endimensionell, vilket innebär att resistiviteten endast varierar med djupet. Begränsningar finns i denna inversionsteknik då resistivitetsmodellen endast kan visa en successiv övergång där det egentligen kan vara skarpa resistivitetskontraster. Modellen blir felaktig där det finns stora resistivetsvariationer i sidled eftersom det görs ett antagande att resistiviteten enbart varierar i djupled. Detta gör att metoden fungerar sämre på exempelvis små lerområden omgivet av berg i dagen. För mindre områden fungerar därför markbundna mätningar bättre än SkyTEM, samt i områden med stora variationer i topografi och jorddjup. Markbundna mätningar är inte heller lika känsliga för störningar från bebyggelse, vägar och järnvägar (Löfroth m.fl., 2018).

1.2 Områdesbeskrivning

1.2.1 Göta älvmrådet

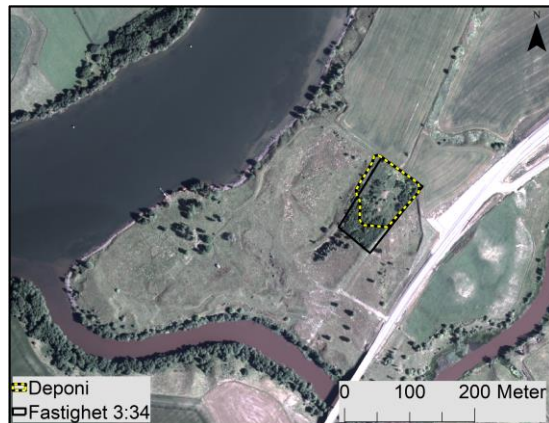
Efter den senaste inlandsisens avsmältning förbands Väneren till havet genom Göta älv och Uddevallasundet (Fredén, 1984). Innan denna avsmältning skedde pressades den skandinaviska berggrunden ned av ett 2–4 kilometer tjockt istäcke som täckte landet (Klingberg, Påsse & Levander, 2006). När isen försvann höjdes landet igen med en beräknad hastighet av 10 millimeter per år (Fredén, 1984). Hastigheten har avtagit med tiden och ligger idag vid Göta älvmrådet på 1–3 millimeter per år (Klingberg m.fl., 2006). Den stora isavsmältningen ledde till att hav under

tusentals år täckte områden som idag utgör land. Detta har lett till att Göta älvs dalgång består av mäktiga lager av lera och silt. Dessa har avsatts i hav ovanpå morän och isälvsavlagringar eller direkt på berg (Klingberg m.fl., 2006). När landet höjdes isostatiskt stängdes Vänerens förbindelse till havet av. Marken som nu kom upp ovanför havsnivån började eroderas, som tydligt kan ses vid Göta älvs och Slumpåns dalgångar (Fredén, 1984).

Mellan Lilla Edet och Göteborg förekommer jorddjup på över 100 meter, medan berg i dagen kan påträffas vid älvens botten norr om Lilla Edet (Klingberg m.fl., 2006). Där berg i dagen återfinns kan också morän ses som fungerar som en infiltrationsväg för grundvatten (Löfroth m.fl. 2018).

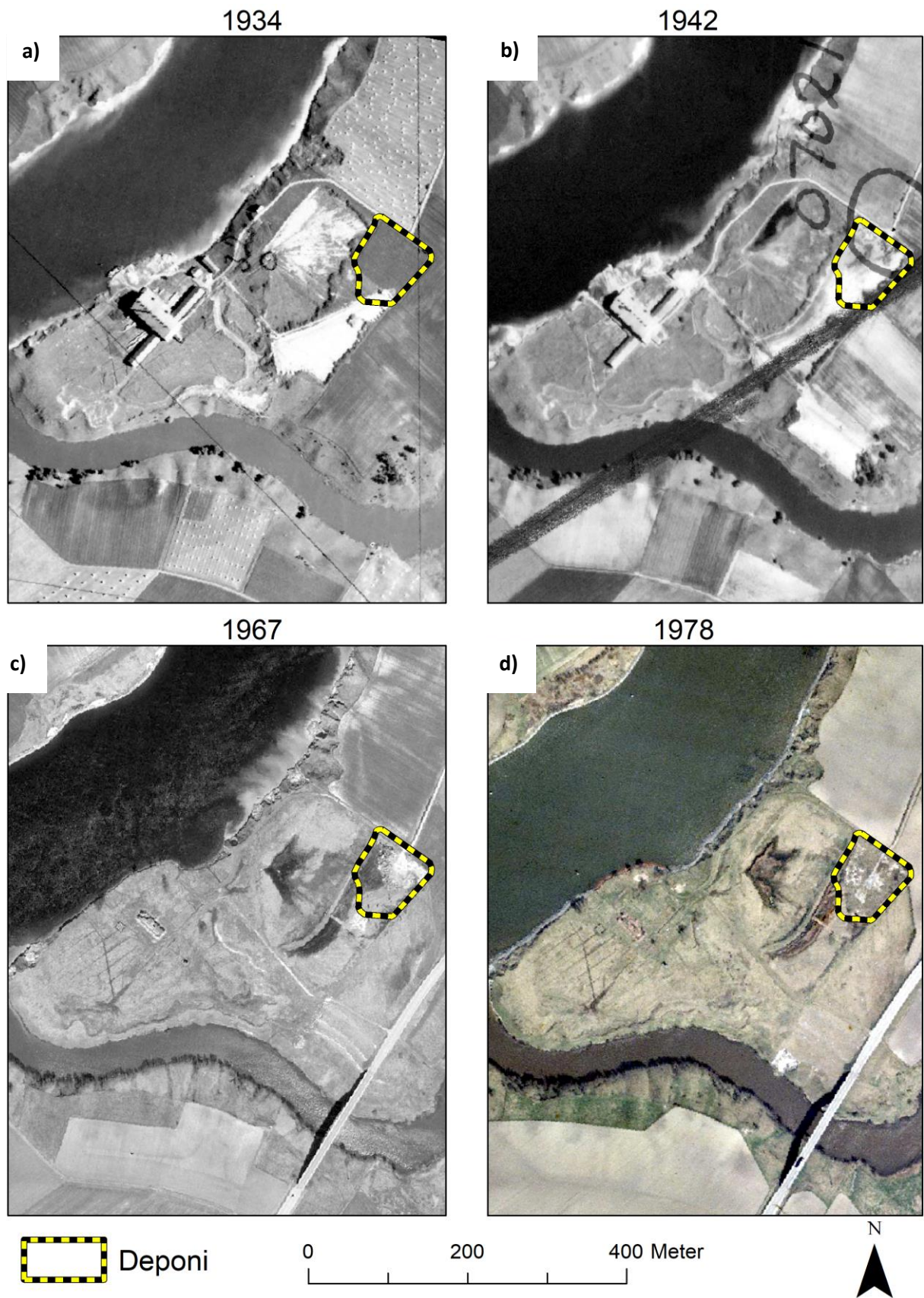
I de översta 1–5 meterna av jordens överyta kring Göta älv finns svämsediment i form av gyttjig lera, silt och sand. Leran är mellan- till högsensitiv och kvicklera finns (Klingberg m.fl., 2006). Sensitivitet är ett mått på förhållandet mellan de odränerade skjuvhållfastheterna i ostört respektive omrört tillstånd, där kvicklera har en hög sensitivitet (SGI, 2008).

1.2.2 Torpadeponin



Figur 4 – Fastighet Torpa 3:34 representeras av den svarta rektangeln och deponins utsträckning representeras av den svartgula markeringen.

Torpadeponin är belägen på fastighet Torpa 3:34 som ägs av Trollhättans kommun (Figur 4). Fastigheten har en area på 8000 kvadratmeter och deponin uppskattas utgöra 5000 kvadratmeter av denna fastighet (Ramböll, 2011a).



Figur 5 - Historiska ortofoton över området kring Torpadeponin. Bilderna visar Torpa tegelbruk under 1934 (a) och 1942 (b) samt hur deponin har utvecklats fram till 1967 (c) och 1978 (d). Dagens utsträckning av deponin visas med svartgul markering. För GIS-datakällor, se avsnitt Referenser GIS-data.

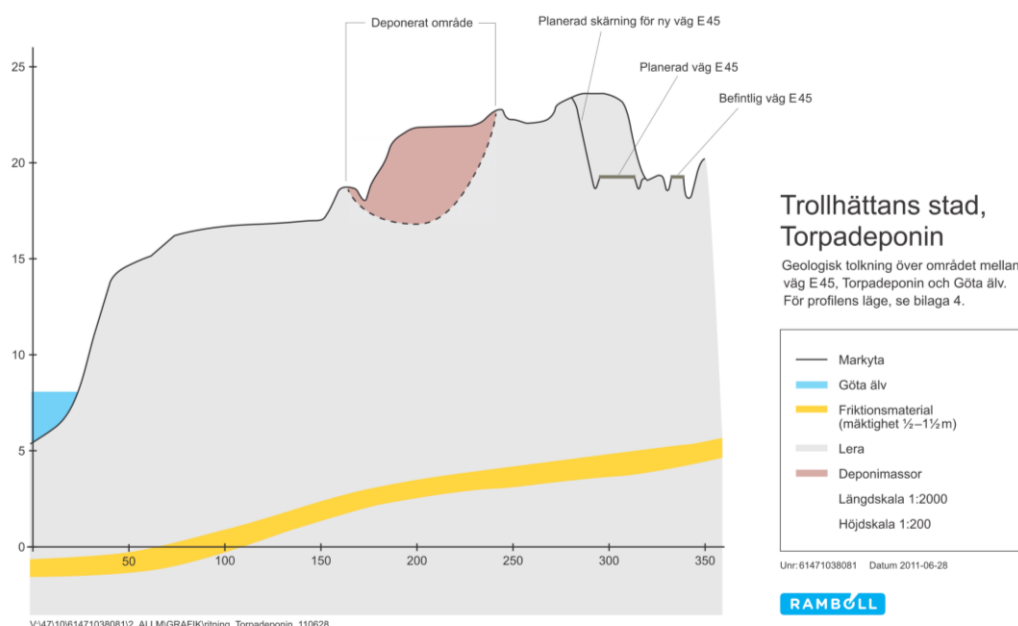
Ingen deponering har skett på fastighetens sydvästra sida (Figur 4). Dock har avfall deponerats 5–10 meter utanför fastigheten i nordväst till nordöst (Ramböll, 2009). I provgropar gjorda av Ramböll (2009) hittades innehåll av schaktmassor, skrot, bildelar, plast, trasiga tunnor, möbler och cyklar. Det deponerade avfallet har en medelmåktighet på 2–2,5 meter med en maximal måktighet bedömd till 4–5 meter. Volymen av det deponerade avfallet är uppskattat till cirka 11 000 kubikmeter (Ramböll, 2011a).

Från 1940-talet fram till år 1973 deponerades avfall i den grop som uppstått då fastighet Torpa 3:34 användes som en lertäkt för ett tegelbruk som förr låg mellan deponin och Göta älv (Ramböll, 2011a). Fastigheten har en vall bestående av tät lera på den västra respektive den östra sidan om deponin. Dessa vallar tros ha använts som transportvägar till och från Torpa tegelbruk (Ramböll, 2009). Detta tegelbruk hade enligt Fredén (1984) en produktion av 5–6 miljoner murstenar under sekelskiftet mellan 1800- och 1900-talet. Tegelbruket är beläget i ett skredärr och kan ses i de historiska ortofotona från 1934 och 1942 (Figur 5a & Figur 5b). Bilden från 1967 (Figur 5c) visar att tegelbruket nu är nedlagt och att massor har börjat deponeras på fastigheten. Vid år 1978 (Figur 5d) har deponin stängt och avfall är synligt.

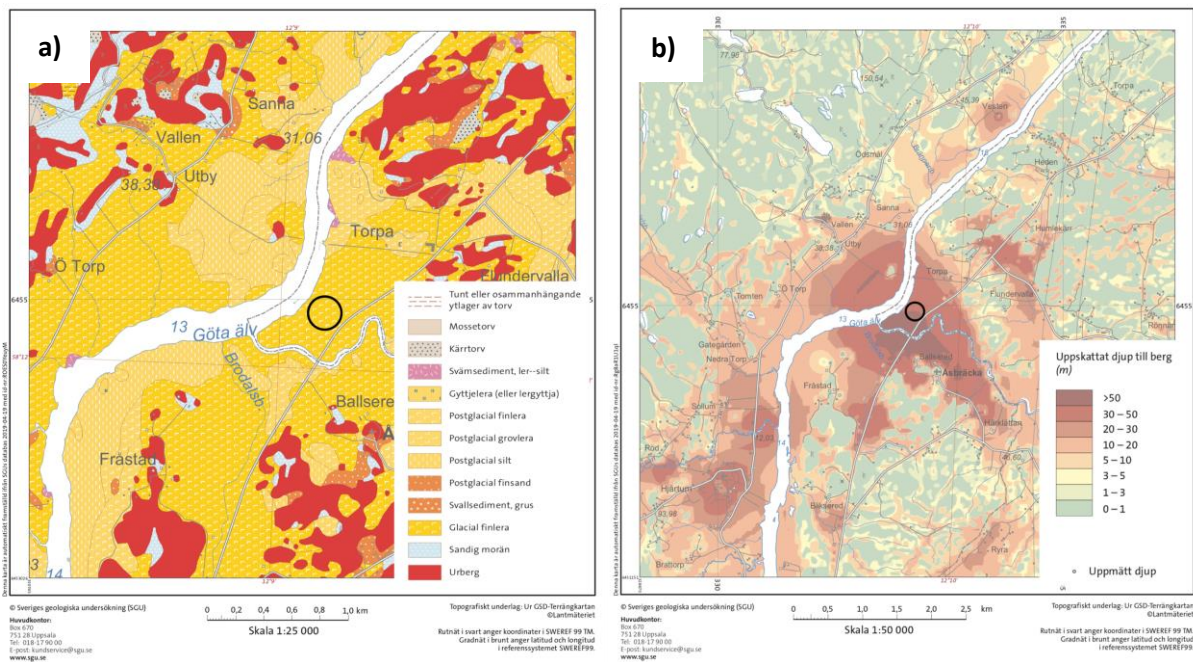
Torpadeponin ligger i ett område med tät lera (Ramböll, 2011a) som är karterat av SGU till glacial finlera (Figur 7a) med ett jorddjup som varierar från 30 meter till över 50 meter (Figur 7b). Linser och skikt av silt förekommer långt ned i leran (Ramböll, 2011a) och närmast berggrunden finns ett lager av vattenförande friktionsmaterial (Vägverket, 2008). Ett 1 meter mäktigt lager av friktionsmaterial finns också 10 meter under deponin (Figur 6). Detta lager har karterats som finsandig lerig silt och anses därmed ha en låg vattenledningsförmåga (Ramböll, 2011a).

I samband med landhöjningen är den större delen av de övre 20–30 meterna av leran norr om Lilla Edet nu urlakade och kvicklera förekommer vid Slumpåns dalgång, där bland annat Torpa flaskskred inträffade någon gång mellan 1686 och 1697 (Fredén, 1984).

Grundvattennivån var i november 2008 belägen 2,4–3,2 meter under markytan och i maj 2010 var den belägen 2,5–3,2 meter under markytan (Ramböll, 2010). Detta innebär att delar av deponin ligger under grundvattennivån (Ramböll, 2011a). Grundvattnets tryckgradient är riktad mot diket på den västra sidan där lakvattensystemet finns (Ramböll, 2009).



Figur 6 - Geologisk tolkning av Ramböll (2011b) mellan väg E45 och Göta älv. Sektionsritningen visar att deponin ligger ovanpå ett mäktigt lerlager med ett lager av friktionsmaterial inuti.



Figur 7 – Modifierade kartor från SGU som visar jordartskarta (a) och jorddjupskarta (b). Det ungefärliga läget för Torpadeponin visas med en svart cirkel. Vid Torpadeponin består marken av glacial finlera och marken runtomkring består av postglacial grovlera och silt. Jorddjupen där Torpadeponin är placerad varierar mellan 30–50 meter och ännu högre jordvärderna finns närmare Slumpån. För referens, se avsnitt Referenser GIS-data.

2 Metod

2.1 Fältmätningar

Torpadeponin undersöktes i fält under april 2019. Resistivitets- och inducerade polarisationsmätningar utfördes samt avvägning för att mäta topografin längs mätlinjerna. Som ett komplement mättes även lakvattnets konduktivitet, pH och temperatur och vattenprover togs för att skickas på laboratorieanalys. En okulär undersökning gjordes över deponin och fotografier togs över intressanta föremål, varvid kameran registrerade platskoordinater

2.1.1 Resistivitet och inducerad polarisation

Mätningar av resistivitet och inducerad polarisation utfördes på Torpadeponin under den första och andra april 2019. För att utföra mätningarna användes metoden CVES (*continuous vertical electrical sounding*) med multielektrodsystem (ABEM Terrameter LS,

Figur 8). Mätprotokollet *Gradient plus* användes eftersom en gradientuppställning tillåter att ett stort antal dataregistreringar kan göras utan att behöva flytta elektroderna (Milsom & Eriksen, 2011).

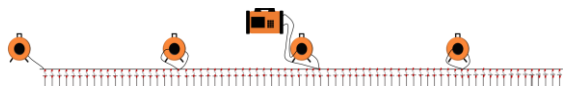


Figur 8 - Bilden visar utrustningen som användes i fält. De instrument som användes för avvägning var trefot, kikare och latta. Till resistivitetsmätningarna användes ABEM Terrameter, kabeltrumma, anslutningskablar, elektroder, hammare och batteri.

Ett elektrodavstånd på två meter användes då upplösningen ansågs väsentligare än den maximala penetrationsförmågan. Ett större elektrodavstånd skulle ge ett större

djupseende men ge en sämre upplösning (Mussett & Khan, 2000 s. 198).

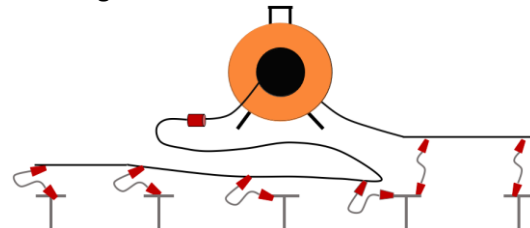
Uppställningen bestod av fyra kabeltrummor med kablar som hade 21 elektroduttag vardera. De fyra kablarna kopplades ihop med ABEM-instrumentet placerat i mitten mellan den andra och den tredje kabeln. Detta gav en profil på 160 meter (Figur 9). Vid förbindelsen mellan två kablar kopplades sista och första elektroduttaget på respektive kabel till samma elektrod med hjälp av två anslutningskablar (Figur 10).



Figur 9 – Omritad bild från förlaga av ABEM (2016) visar principupställningen där kablarna rullas ut i profilens riktning. ABEM-instrumentet är ihopkopplat mellan den andra och den tredje kabeln och kablarna ansluts till elektroderna med hjälp av anslutningskablar.

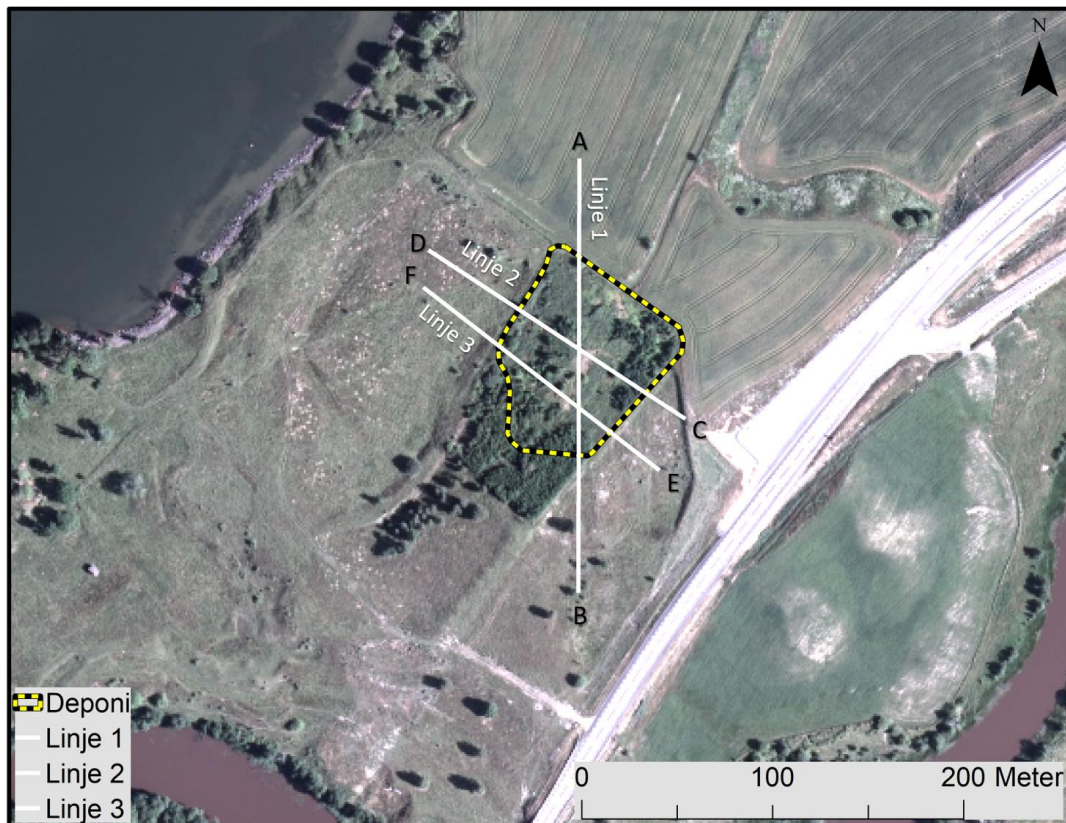
För att få en profil längre än 160 meter användes *roll along*-metoden där den första kabeln flyttades fram till efter den sista kabeln när mätningen var klar. Då flyttades samtidigt instrumentet till det som blev det nya mittenläget och en ny mätning kunde påbörjas

vars data automatiskt lades på den förra mätningen.



Figur 10 - Visar koppling mellan elektroduttag 21 på kabel 1 och elektroduttag 1 på kabel 2. På bilden ses kabeltrumma, anslutningskablar, elektroder och kabelskarv.

Koordinater från flygmätningens datapunkter lades in i Google Maps eftersom en av mätlinjerna (Linje 1, Figur 11) skulle följa flygmätningens linje över deponin. Denna överensstämmelse var önskvärd då en jämförelse mellan dessa behövdes för en korrekt analys. Dock var flygmätningen över fastigheten där deponin befinner sig inte rak och kunde därför inte att följas till fullo, eftersom en rak profil krävs för att markbundna undersökningsresultat skall bli korrekta.



Figur 11 - Visar hur de tre mätlinjerna drogs över deponin som visas med svart-gul markering. A, C och E representerar startpunkterna på mätlinjerna och B, D och F representerar slutpunkterna. För GIS-datakällor, se avsnitt Referenser GIS-data.

Linje 1 påbörjades och avslutades utanför deponin för att få med bakgrundsvärden och blev 240 meter lång. För att få mer information om deponin och för att avgränsa den gjordes även två kortare mätlinjer (*Linje 2 och Linje 3*) på 160 meter vardera som korsar Linje 1. Dessa påbörjades och avslutades också utanför deponin (*Figur 11*).

De markbundna mätningarna skapar en pseudosektion av marken som sedan kan bearbetas i datorprogrammet Res2DInv för att skapa en profil.

2.1.2 Avvägning

För att få in topografi i resistivitetsmodellen gjordes avvägning längsmed de markbundna mätlinjerna. För detta användes en kikare på en trefot och en latta (*Figur 8*) med tillhörande lod för att försäkra lattans horisontella placering. De relativa höjdskillnaderna mättes mellan olika punkter längs profilerna som valdes utefter synliga topografivariationer. I början på varje linje mättes först en punkt bakåt för att få en första referenspunkt, sedan mättes höjdskillnaderna framåt i flera steg tills dess att kikaren inte längre kunde se lattan, antingen beroende på träd eller buskar som var i vägen eller för att höjdskillnaderna var så stora att lattan hamnade antingen under eller ovanför kikarens sikte. När detta skedde flyttades kikaren framåt och en ny referenspunkt bakåt togs på den plats där den senaste höjdpunkten mättes. Dessa relativa topografivärden beräknades sedan i Microsoft Excel och höjden i meter över havet lades in från värden hämtade från en höjdmödel i GIS (Geografiskt informationssystem). Topografin kunde sedan läggas in i datafilerna från resistivitetsmätningarna och läsas in i Res2DInv.

2.1.3 Lakvattenmätningar

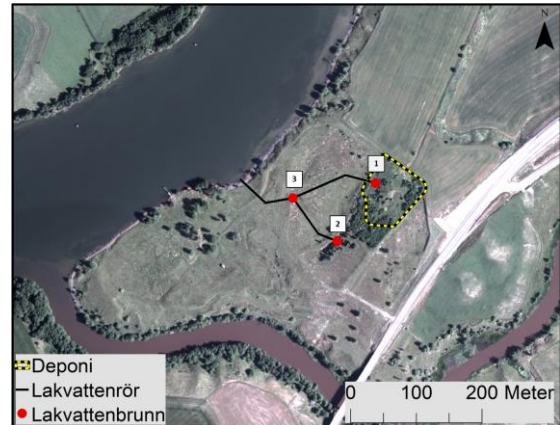
För att komplettera resistivitetsmätningarna mättes konduktivitet, pH och temperatur på vattnet i den lakvattenbrunn som låg inom området för deponin (*Figur 12, lakvattenbrunn 1*). Detta mättes de två första fältdagarna, den första och andra april. Lakvattnets

konduktivitet (σ) kunde sedan räknas om till resistivitet (ρ) genom att härleda *Ekvation 3* till:

Ekvation 5

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

När resistiviteten av lakvattnet räknats fram kunde detta jämföras med den uppmätta resistiviteten från mark- och flygmätningarna.



Figur 12 - Ortofoto över deponin som är belägen inom den gul-svarta markeringen. Kartan visar deponins lakvattensystem där lakvattnet från brunn 1 och 2 samlas upp i brunn 3 för att sedan rinna ut i Göta älv. För GIS-datakällor, se avsnitt Referenser GIS-data.

För att ytterligare analysera lakvattnet togs vattenprover den nionde april från samma brunn som konduktivhetsmätningarna utfördes på (*lakvattenbrunn 1, Figur 12*). Dessa skickades på analys hos företaget Eurofins, där de parametrar som undersöktes ingick i de två analyspaketerna *Grundpaket för lakvatten och Metaller i vatten (Tabell 2)*. För att deras analyser skulle bli korrekta mättes vattnets temperatur i fält.

Tabell 2 - Visar de analyserade parametrarna av lakvattenproverna. De analyspaket som utfördes var Grundpaket för lakvatten och Metaller i vatten.

Analyspaket	Analyserade parametrar
Grundpaket för lakvatten	Turbiditet, färg, suspenderade ämnen, pH, alkalinitet, konduktivitet, klorid, sulfat, fluorid, syre, syremättnad, TOC, DOC, biokemisk syreförbrukning, ammoniumkväve, fosfatfosfor, nitratkväve, nitrit-nitrogen samt fosfor
Metaller i vatten	Natrium, kalium, kalcium, järn, magnesium, mangan, aluminium, antimon, arsenik, barium, beryllium, bly, bor, fosfor, kadmium, kisel, kobolt, koppar, krom, litium, molybden, nickel, selen, silver, strontium, svavel, tallium, tenn, titan, uran, vanadin samt zink

2.2 Databearbetning

Den insamlade fältdata och den erhållna data från flygmätningarna bearbetades och analyserades i olika datorprogram. Olika kartor över studieområdet togs fram och profiler över deponin framställdes.

2.2.1 Resistivitet och inducerad polarisation

De markbundna resistivitets- och inducerade polarisationsmätningarna lades in i programmet Res2DInv för att bearbetas. Programmet använder en cellindelningmetod för inversion som delar in marken i lika stora celler vars positioner och storlekar är fixerade (Loke, Acworth & Dahlin, 2001). Då det är skarpa kontraster i resistivitetsdata optimeras data genom att använda L_1 -normen, *robust constraints*, som Loke m.fl. (2001) påtalar är mer motståndskraftig mot dåliga datapunkter och störningar. L_1 -normen användes för alla mätlinjer tillsammans med *smoothing* för att få mjukare gränser. Cellerna som programvaran

delar in marken i är förinställda på att vara lika stora som elektroavståndet, men i och med att mätningarna över Torpadeponin visade på stora resistivitetsvariationer nära ytan tillämpades celler som var halva elektroavståndet för att få ett bättre resultat. Linje 1 och 2 forcerades till att ha positiva värden då resistivitetsdata innehöll negativa mätningar. Inverteringen av Linje 2 blev instabil och visade på stora resistivitetskontraster. Detta ledde till att vissa datapunkter togs bort som tolkades som felaktiga mätvärden och inversionen dämpades något.

För att få representativa färgskalor på figurerna sattes en färggradient med värdena 0 till $>1000 \Omega m$ för resistiviteten, samt 0 till >8 millisekunder för den inducerade polarisationen. Färggradienten för den inducerade polarisationen bestämdes utefter Linje 3 som visade på lägst värden. Den vertikala och den horisontella skalan bestämdes utefter Linje 1 då det är den längsta linjen.

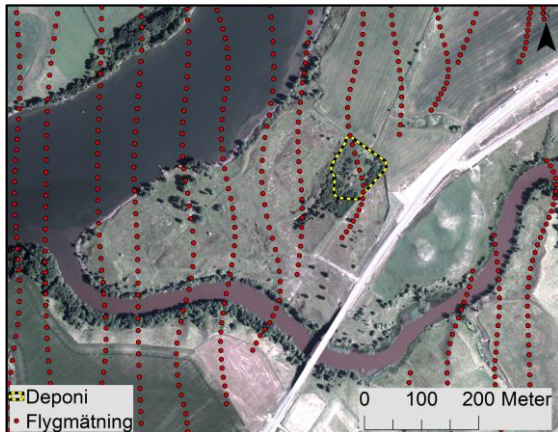
Med hjälp av resistivitet, inducerad polarisation och arkivstudier har en tolkning av deponins utsträckning och den omkringliggande geologin på respektive linje utförts.

2.2.2 Helikopterburen transient elektromagnetism

För att korrelera den egenuppmätta resistivitetsdata med flygmätningarna exporterades de inverterade filerna från Res2DInv till xyz-filer. Dessa xyz-filer kunde då bearbetas i Microsoft Excel där resistivitet med djupinformation kunde visas. Värdena från resistiviteten och den inducerade polarisationen jämfördes därefter med de flygburna mätningarna från ungefär samma djup genom att rita dem i diagram.

Den inverterade resistivitetsmodellen av flygmätningarna bearbetades också i GIS-programmet ArcMap. Mätpunkterna som användes ses i *Figur 13*. Dessa interpolerades och tilldelades en färgkodning som efterliknar de färger som ges i Res2DInv.

Resistivitetsvärden från olika djup interpolerades med verktyget *inverse distance weighting* (IDW) med standardinställningar för att se hur mätvärdena varierar med djupet, där samma djup som för Excel-diagrammen valdes för att enklare kunna jämföra dem med varandra.



Figur 13 – De röda punkterna visar datapunkter från flygmätningarna. Deponin visas med svart-gul markering.

2.2.3 Kartor

Olika översiktskartor konstruerades med data hämtat från Lantmäteriet samt med en *basemap* från ArcMap. Georeferering av historiska flygfoton gjordes för att se deponins utveckling genom åren. Rambölls egna kartor över deponin georefererades också så att lakvattensystemet och de deponerade massornas utsträckning kunde läggas in manuellt. För referenser, se avsnittet *Referenser GIS-data*.

3 Resultat

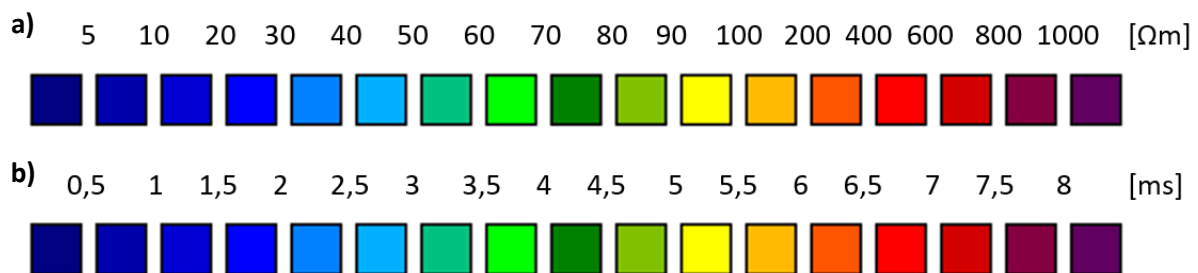
3.1 Resistivitet och inducerad polarisation

Här presenteras modellerna framtagna i Res2DInv över markens resistivitet och inducerade polarisation. De två mätvärdena visas för Linje 1, Linje 2 och Linje 3 vardera tillsammans med en geologisk tolkning av profilerna. Resultatet av den geologiska tolkningen är en kombination av markmätningar och arkivstudier. För att enklare kunna avläsa figurerna presenteras legender för resistiviteten och den inducerade polarisationen som visar brytvärdena för varje färg i Ωm respektive millisekunder (ms) (Figur 14 & Figur 14b).

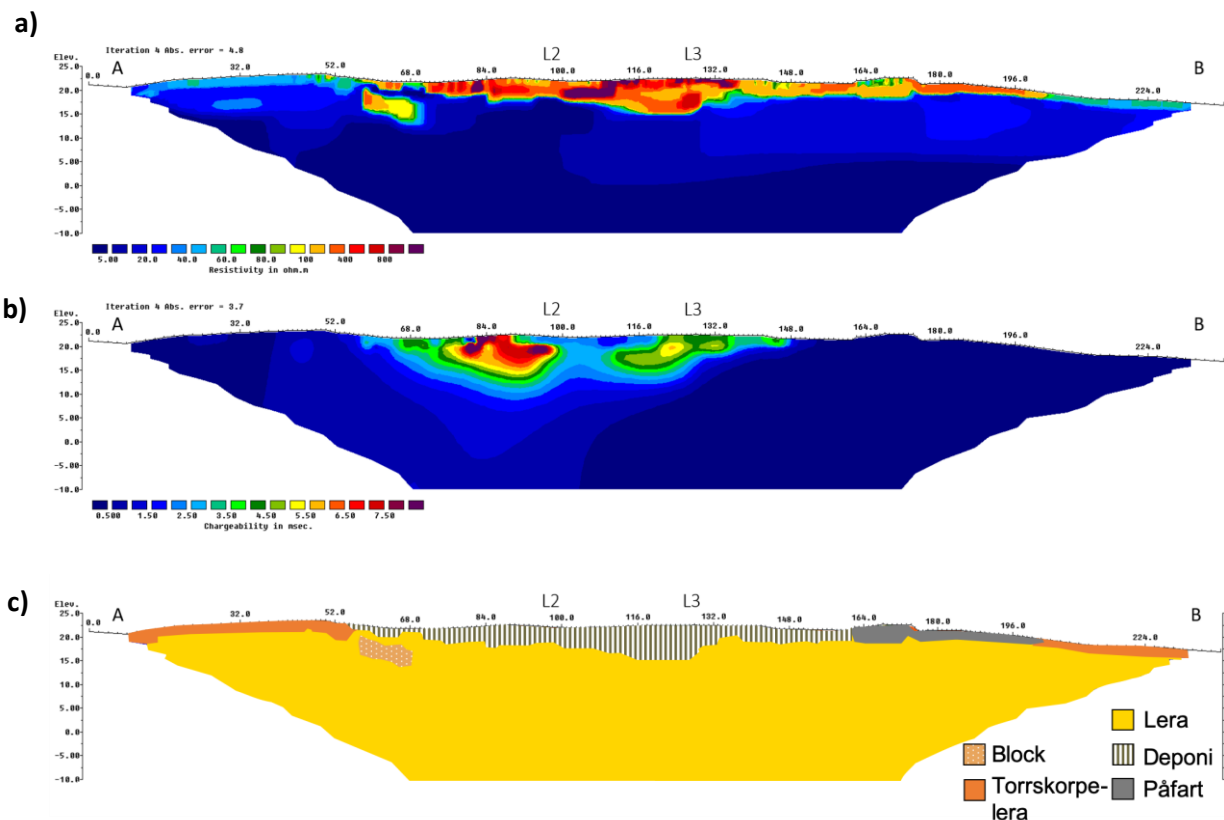
3.1.1 Linje 1

Start- och slutpunkt för Linje 1 (Figur 15) är markerat med A och B, som även ses Figur 11. L2 och L3 visar ungefär var mätlinjerna för Linje 2 och Linje 3 korsar Linje 1.

Till vänster och höger i Figur 15a uppvisar markytan resistivitetsvärden runt 50 Ωm medan mellan 60–200 meter i profilens längd syns värden från 100 till över 1000 Ωm . Till vänster ses ett isolerat område med högre resistivitet. De höga resistivitetsvärdena når inte djupare än ca 15 meter där värdena blir mindre än 5 Ωm .



Figur 14 -Legend för resistiviteten (a) och för den inducerade polarisationen (b). Lägsta värde är 0 för båda enheterna.



Figur 15 - Linje 1:s mätvärden av resistivitet (a) och inducerad polarisation (b). A och B är mätlinjens start- och slutpunkt. L2 och L3 är där Linje 2 och Linje 3 korsar Linje 1. En geologisk tolkning av Linje 1 (c) visar deponins utsträckning samt påfartsramp, lera, torrskorpelera och vad som tros kan vara ett block

Inducerad polarisation syns mellan cirka 60–150 meter i profilens längd (Figur 15b), där högst värden fås runt 85 meter med värden från 5 till över 8 millisekunder.

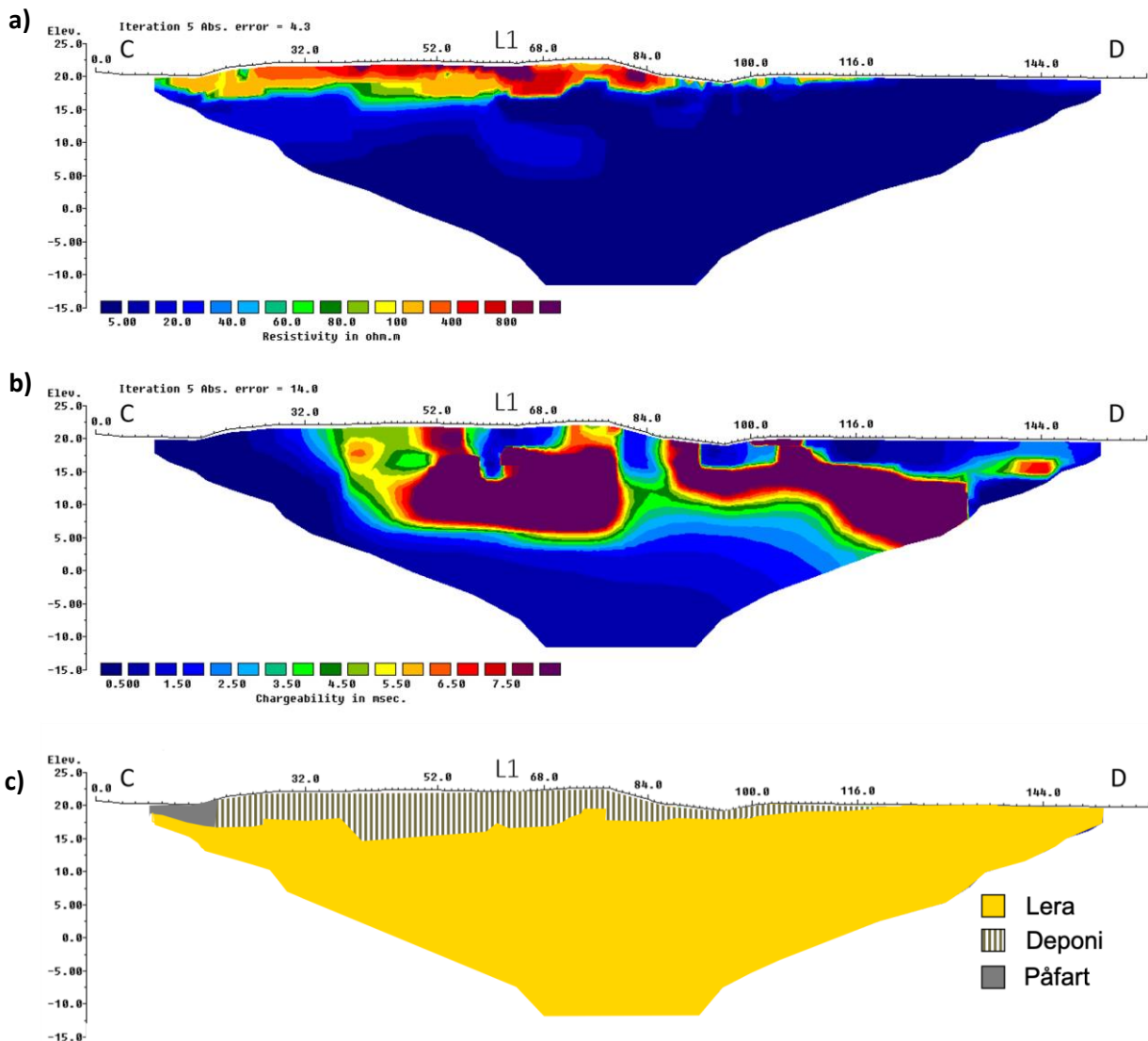
Deponins utsträckning är tolkat att sträcka sig mellan cirka 55 meter och 160 meter längs med Linje 1. Deponin har i modellen ett maxdjup på 6–7 meter (Figur 15c). Till höger om deponin finns material från en påfartsramp och torrskorpelera finns vid ytan. Undertill består marken av lera och ett misstänkt block finns under deponins vänstra sida.

3.1.2 Linje 2

Start- och slutpunkt för Linje 2 (Figur 16) är markerat med C och D, som även ses i Figur 11. L1 visar ungefär var Linje 1 korsar Linje 2.

I Figur 16a syns markytans högsta resistivitetvärden de första 90 meterna i profilens längd, sedan får markytan lika låg resistivitet som underliggande lager. Inducerad polarisation syns kraftigt i Figur 16b där stora områden både i mitten och till höger i profilen visar värden högre än 8 millisekunder som sträcker sig cirka 15 meter ned i marken.

Tolkning av deponins utsträckning (Figur 16c) har i modellen ett maxdjup på 5 meter. Till vänster om deponin finns material från en påfartsramp och undertill består marken av lera.



Figur 16 - Linje 2:s mätvärden av resistivitet (a) och inducerad polarisation (b). C och D är mätlinjens start- och slutpunkt. L1 är där Linje 1 korsar Linje 2. En geologisk tolkning av Linje 2 (c) visar deponins utsträckning samt påfartsramp och lera.

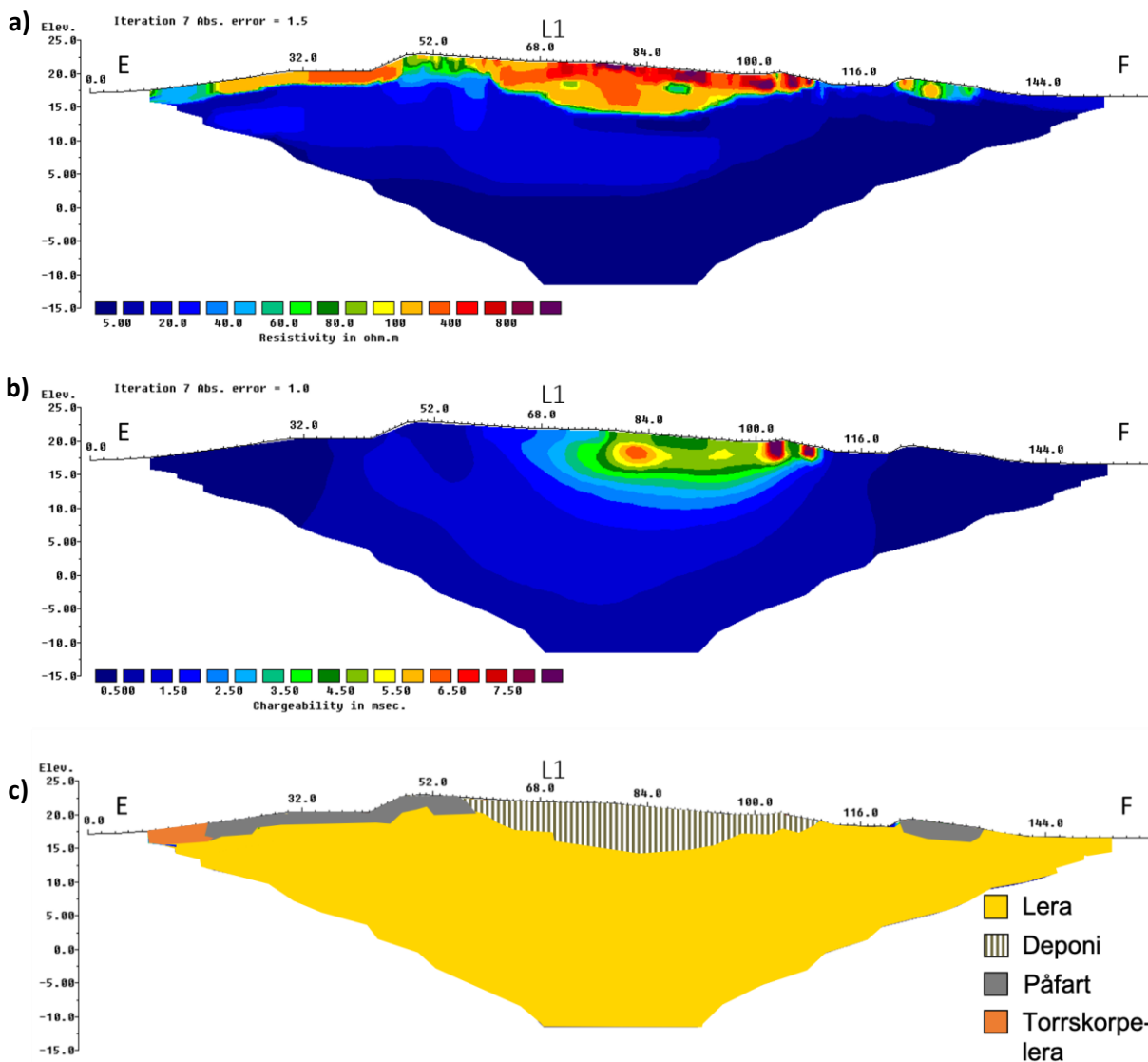
3.1.3 Linje 3

Start- och slutpunkt för Linje 3 (Figur 17) är markerat med E och F, som även kan ses i Figur 11. L1 visar ungefär var Linje 1 korsar Linje 3.

De högsta resistivitetsvärdena i Figur 17a syns i två sektioner till vänster och höger om den topografiska skillnaden runt 50 meter i profilens längd. Sedan kan också högre resistivitet ses vid den topografiska skillnaden till höger, runt 120 meter i profilens längd.

Den inducerade polarisationen i Figur 17b visar lägst värden av alla mätlinjer. Två punkter syns med värden högre än 8 millisekunder och en tredje punkt till vänster om dessa har värden runt 6 millisekunder. Annars visas tämligen låga värden.

Tolkning av deponins utsträckning (Figur 17c) har i modellen ett maxdjup på 7,5 meter. Till vänster och höger om deponin finns material från påfartsramp och undertill består marken av lera. Torrskorpelera finns vid ytan.



Figur 17 - Linje 3:s mätvärden av resistivitet (a) och inducerad polarisation (b). E och F är mätlinjens start- och slutpunkt. L1 är där Linje 1 korsar Linje 3. En geologisk tolkning av Linje 3 (c) visar deponins utsträckning samt påfartsramp, lera och torrskorpe-lera.

3.2 Lakvattenmätningar

De lakvattenmätningar som genomfördes under den första och andra april visar något skilda resultat (Tabell 3). Under första dagen var både pH, konduktivitet, lösta ämnen (*total dissolved solids*) och temperatur lägre än under andra dagen. Då konduktiviteten är lägre leder detta till en högre resistivitet, enligt uträkning av Ekvation 5.

Tabell 3 - Visar mätvärdena från lakvattenbrunn 1. Mätvärden som presenteras är pH, konduktivitet, lösta ämnen, temperatur och beräknad resistivitet.

MULTIPARAMETER	1 APRIL	2 APRIL
pH	6,72	7
KONDUKTIVITET [mS/cm]	61,4	70,5
RESISTIVITET [Ω m]	16	14
LÖSTA ÄMNINGEN [mg/l]	307	353
TEMPERATUR [°C]	5,08	5,27

I Tabell 4 är vattenproverna som blivit analyserade av Eurofins jämförda mot SGU:s riskklasser. De värden som hamnar i riskklass 5 (den högsta riskklassen) är färg, turbiditet och sulfat. I riskklass 4 hamnar koppar, kalcium, kalium och magnesium.

Konduktivitet, nickel, zink, natrium och bor hamnar i riskklass 3. I riskklass 2 hamnar alkalinitet, pH, klorid och mangan. Slutligen hamnar syre, aluminium, järn, arsenik, uran, bly, kadmium, krom och fluorid i riskklass 1.

Tabell 4 - Visar mätvärden från vattenprover som togs i lakvattenbrunn 1 i april 2019. Värdena har jämförts mot SGU:s (2013) riskklasser av grundvatten. De olika riskklasserna är markerade med olika färger och det uppmätta värdet från Eurofins har tilldelats den färg som den riskklass värdet hamnar i.

PARAMETER	LAKVATTEN-BRUNN 1	SGU RISKKLASSER FÖR GRUNDVATTEN					ENHET
		1	2	3	4	5	
ALKALINITET	160	>180	60–180	30–60	10–30	<=10	mg HCO ₃ /l
pH	7,4	>8,5	7,5–8,5	6,5–7,5	5,5–6,5	<=5,5	
SYRE	2,9	>10	7,5–10	5–7,5	2,5–5	<=2,5	mg/l
NITRAT	<0,1	<2	2–5	5–20	20–50	>=50	mg/l
NITRIT	<0,002	<0,01	0,01–0,05	0,05–0,1	0,1–0,5	>=0,5	mg/l
AMMONIUM	0,023	<0,05	0,05–0,1	0,1–0,5	0,5–1,5	>=1,5	mg/l
FÄRG	340	<5	5–15	15–30	30–60	>=60	mg Pt/l
TURBIDITET	210	<0,5	0,5–1,5	1,5–3	3–6	>=6	FNU
KLORID	23	<5–20	20–50	50–100	100–300	>=300	mg/l
FOSFAT	0,028	<0,02	0,02–0,04	0,04–0,1	0,1–0,6	>=0,6	mg/l
KONDUKTIVITET	62	<10–25	25–50	50–75	75–150	>=150	mS/m
SULFAT	120	<5–10	10–25	25–50	50–100	>=100	mg/l
ALUMINIUM	0,0071	<0,01	0,01–0,05	0,05–0,1	0,1–0,5	>=0,5	mg/l
JÄRN	0,0014	<0,1	0,1–0,2	0,2–0,5	0,5–1	>=1	mg/l
MANGAN	0,063	<0,05	0,05–0,1	0,1–0,3	0,3–0,4	>=0,4	mg/l
ARSENIK	0,21	<1	1–2	2–5	5–10	>=10	µg/l
URAN	0,84	<5	5–10	10–15	15–30	>=30	µg/l
BLY	<0,01	<0,5	0,5–1	1–2	2–10	>=10	µg/l
KADMIUM	0,066	<0,1	0,1–0,5	0,5–1	1–5	>=5	µg/l
KOPPAR	1,1	<0,02	0,02–0,2	0,2–1	1–2	>=2	mg/l
KROM	0,055	<0,5	0,5–5	5–10	10–50	>=50	µg/l
NICKEL	8	<0,5	0,5–2	2–10	10–20	>=20	µg/l
ZINK	0,05	<0,005	0,005–0,01	0,01–0,1	0,1–1	>=1	mg/l
KALCIUM	67	<10	10–20	20–60	60–100	>=100	mg/l
KALIUM	16	<3	3–6	6–12	12–50	>=50	mg/l
MAGNESIUM	22	<2	2–5	5–10	10–30	>=30	mg/l
NATRIUM	21	<5	5–10	10–50	50–100	>=100	mg/l
BOR	0,14	<0,01	0,01–0,1	0,1–0,5	0,5–1	>=1	mg/l
FLUORID	0,39	<0,4	0,4–0,8	0,8–1,5	1,5–4	>=4	mg/l

*SGU presenterar värdena som nitrit, nitrat, ammonium och fosfat. Denna studie har analyserat kväve i form av nitrit, nitrat och ammonium samt fosfor i form av fosfat.

De analyserade vattenproverna från lakvattenbrunn 1 har även jämförts med vattenprovtagningar utförda av Ramböll (2010) som provtagit i samma lakvattenbrunn (Tabell 5). I denna jämförelse kan det konstateras att de flesta ämnena har liknande

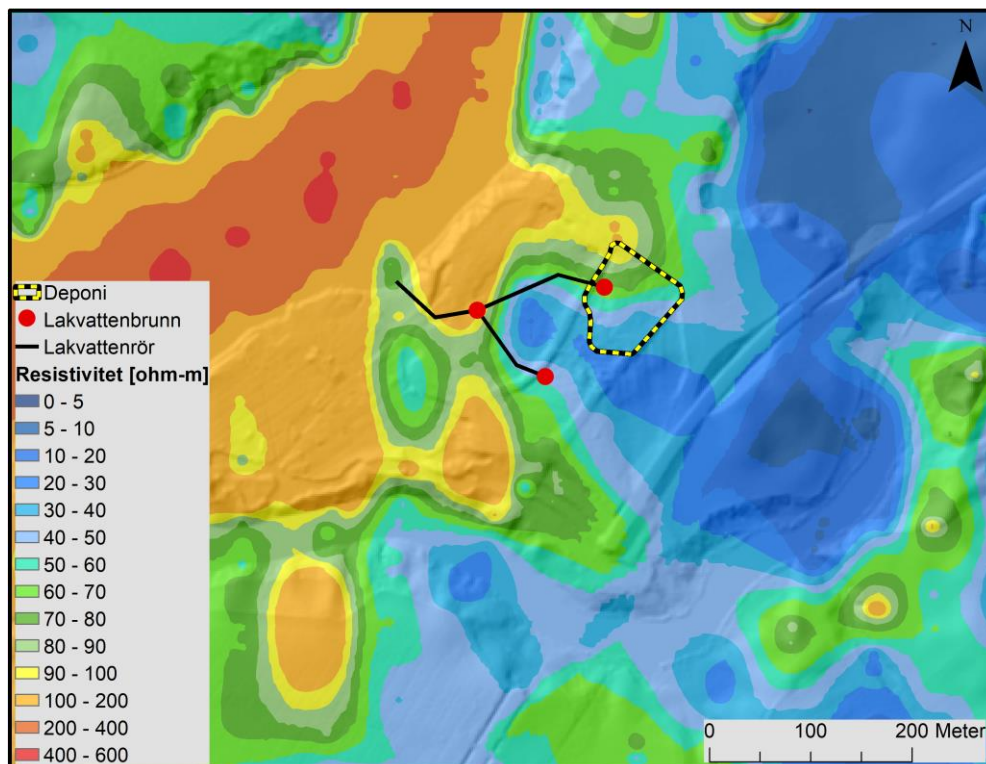
koncentrationer. Nickel, aluminium och mangan har lägre koncentration från denna studie än de värden som tagits av Ramböll (2010) medan de värden som har en högre koncentration är turbiditet och färg. Alla analyserade parametrar kan ses i *Bilaga 1*.

Tabell 5 - Mätvärden från denna studie jämförda mot tidigare provtagningar gjorda av Ramböll (2010).

PARAMETER	RAMBÖLL	DENNA STUDIE	ENHET
ARSENIK	<1,0	0,21	µg/l
BARIUM	65,4	70	µg/l
KADMIUM	<0,2	0,066	µg/l
KOBOLT	5,38	0,59	µg/l
KROM	<5,0	0,055	µg/l
MOLYBDEN	1,1	1,2	µg/l
NICKEL	17	8	µg/l
BLY	1,5	<0,01	µg/l
TENN	<1,0	<0,1	µg/l
VANADIN	<5,0	0,075	µg/l
ZINK	57,2	50	µg/l
KALCIUM	67	62,1	mg/l
MAGNESIUM	22	26,5	mg/l
NATRIUM	21	22,6	mg/l
KALIUM	17,9	16	mg/l
JÄRN	0,379	0,0014	mg/l
ALUMINIUM	305	7,1	µg/l
KOPPAR	1,76	1,1	µg/l
MANGAN	349	63	µg/l
TURBIDITET	32	210	FNU
FÄRG	40	340	mgPt/l
KONDUKTIVITET	65,2	62	mS/m
pH	7,4	7,4	
ALAKALINITET	190	160	mg HCO ₃ /l
NITRIT*	<0,01	0,002	mg/l
AMMONIUM*	<0,05	0,023	mg/l
FOSFAT*	<0,04	0,028	mg/l
NITRAT*	<0,5	0,01	mg/l
FLOURID	0,62	0,39	mg/l
SULFAT	162	120	mg/l

*Ramböll har analyserat nitrit, nitrat, ammonium och fosfat. Denna studie har analyserat kväve i form av nitrit, nitrat och ammonium samt fosfor i form av fosfat.

3.3 Helikopterburen transient elektromagnetism



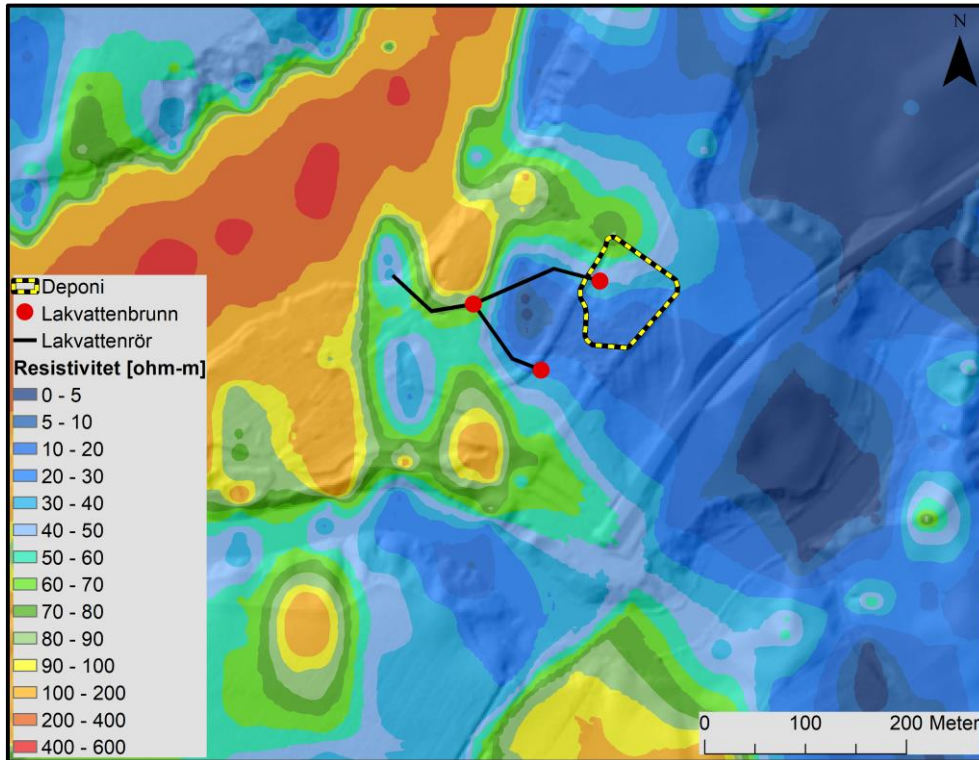
Figur 18 - Interpolerad resistivitetsmodell I från flygmätningar över området. Deponin visas med svart-gul markering och lakvattensystemet som röda punkter och svarta linjer. Mät djupet är 1–2,1 meter. För GIS-datakällor, se avsnitt Referenser GIS-data

I dessa figurer (Figur 18 till Figur 20) presenteras resistiviteten vid olika djup från nära markytan ned till cirka 10 meter under marken. Resistiviteten är interpolerad från den flygburna mätdatan. Avståndet mellan flyglinjerna är cirka 75 meter och är utförda på 30–50 meters höjd (Löfroth m.fl., 2018). Deponin syns som svartgul markering, lakvattenbrunnarna som röda punkter och lakvattenrören som svarta linjer.

Vid 1,5 meters djup (Figur 18) syns högre resistivitet vid deponins norra hörn relativt dess södra. Högsta värdet i deponin är 90–100 Ωm varvid det lägsta är 30–40 Ωm . Mellan lakvattenbrunnarna syns det hur en plym av lägre resistivitet uppkommer. Den högsta

resistiviteten som syns i kartan är över Göta älv (kartbildens vänstra hörn) som har värden mellan 100–600 Ωm . Det kan noteras att det inte är en tydlig kontrast mellan Göta älv och leran.

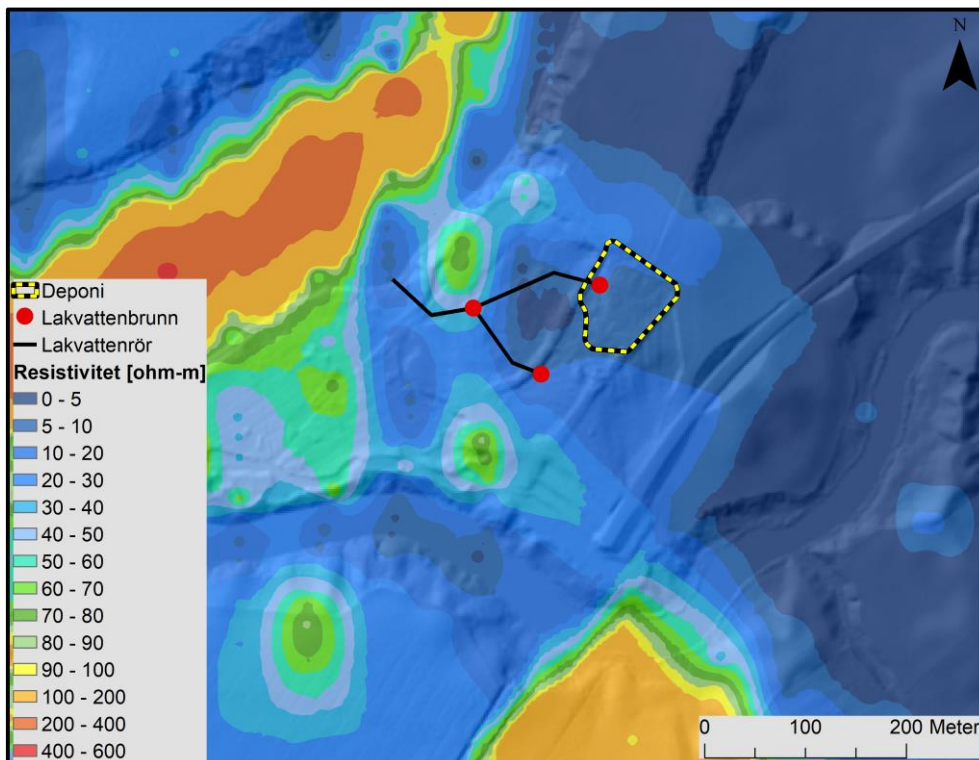
Vid 5,5 meters djup (Figur 19) är deponin dominerad av låga resistivitetsvärden. Där lakvattenrören mynnar ut i Göta älv visas också låga värden, medan älven i sig visar på fortsatt hög resistivitet. I kartbildens södra del uppkommer ett område med högre resistivitet medan i den sänka som syns i kartans nordöstra hörn (vilket är det flaskhalskred som tidigare har nämnts) sjunker resistiviteten. På detta djup är det fortfarande ingen tydlig kontrast mellan Göta älv och den omgivande leran.



Figur 19 - Interpolerad resistivetsmodell från flygmätningar över området. Deponin visas med svart-gul markering och lakvattensystemet som röda punkter och svarta linjer. Mät djupet är 4,9–6,6 meter. För GIS-datakällor, se avsnitt Referenser GIS-data.

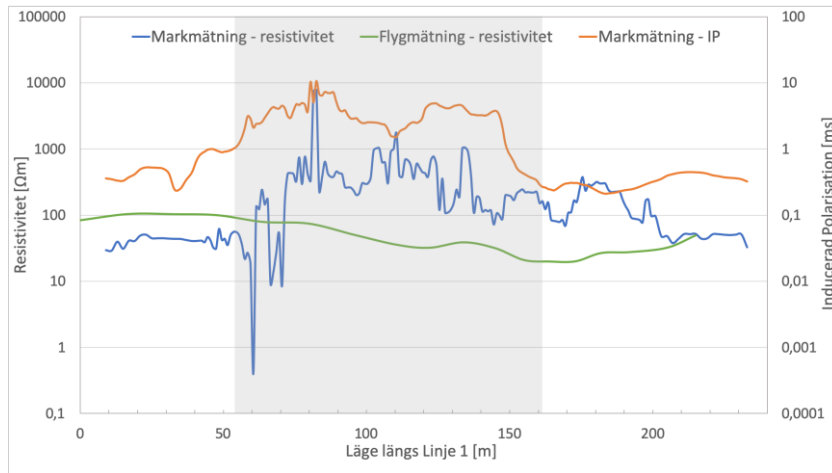
Vid 10 meters djup (Figur 20) är endast de lägsta resistivetsvärdena synliga vid deponin

och den höga resistiviteten från Göta älv är nu inte lika utbredd.



Figur 20 - Interpolerad resistivetsmodell från flygmätningar över området. Deponin visas med svart-gul markering och lakvattensystemet som röda punkter och svarta linjer. Mät djupet är 8,5–10,7 meter. För GIS-datakällor, se avsnitt Referenser GIS-data.

3.3.1 Helikopterburen transient elektromagnetism jämfört mot markmätningar



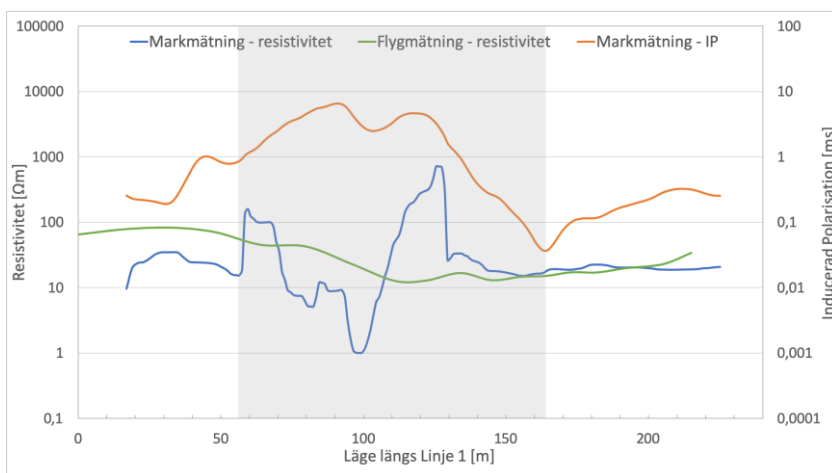
Figur 21 - Diagram som jämför den markbundna mätningen av resistivitet (blå linje) och inducerad polarisation (orange linje) med den flygburna resistivitetsmätningen (grön linje). Värdena för resistivitet visas på den vänstra y-axeln och värdena för inducerad polarisation visas på den högra. Läge längs mätlinjen visas på x-axeln. Det skuggade området representerar deponins ungefärliga utsträckning. Djupet är cirka 1,5 meter baserat på markmätningen som är tagen på 1,49 meters djup och flygmätningen som är tagen på 1–2,1 meters djup.

För att jämföra flygmätningarna med de markmätningar som gjordes i fält har diagram skapats där dessa kan korreleras. Diagrammen visar resistiviteten från flygmätningarna som grön linje och resistiviteten samt den inducerade polarisationen från Linje 1 som blå respektive orange linje. Det skuggade området i diagrammen representerar deponins ungefärliga utsträckning. Diagrammen visar samma djup som de interpolerade resistivitetsmodellerna.

På 1,5 meters djup (Figur 21) kan det ses att resistiviteten och den inducerade polarisationen från markmätningen är som högst vid deponin. Resistiviteten från

markmätningarna varierar mellan 1–7000 Ωm och den inducerade polarisationen varierar mellan 0,1–10 millisekunder. Resistiviteten från flygmätningarna har en jämn resistivitet som varierar mellan 20–100 Ωm .

Resistiviteten från markmätningen varierar mellan 10–700 Ωm på ett djup av 5,5 meter (Figur 22) och den inducerade polarisation varierar mellan cirka 0,05–7 millisekunder. Mätvärdena visar nu inte på lika stora variationer som på 1,5 meters djup men är fortfarande oregelbundna. Resistiviteten från flygmätningarna visar upp ett fortsatt jämnare resultat och varierar mellan 15–80 Ωm .



Figur 22 - Diagram som jämför den markbundna mätningen av resistivitet (blå linje) och inducerad polarisation (orange linje) med den flygburna resistivitetsmätningen (grön linje). Värdena för resistivitet visas på den vänstra y-axeln och värdena för inducerad polarisation visas på den högra. Läge längs mätlinjen visas på x-axeln. Det skuggade området representerar deponins ungefärliga utsträckning. Djupet är cirka 5,5 meter baserat på markmätningen som är tagen på 5,53 meters djup och flygmätningen som är tagen på 4,9–6,6 meters djup.



Figur 23 -Diagram som jämför den markbundna mätningen av resistivitet (blå linje) och inducerad polarisation (orange linje) med den flygburna resistivitetmätningen (grön linje). Värdena för resistivitet visas på den vänstra y-axeln och värdena för inducerad polarisation visas på den högra. Läge längs mätlinjen visas på x-axeln. Det skuggade området representerar deponins ungefärliga utsträckning. Djupet är cirka 10 meter baserat på markmätningen som är tagen på 9,84 meters djup och flygmätningen som är tagen på 8,5–10,7 meters djup

Resistiviteten från markmätningen på ett djup av 10 meter (Figur 23) varierar mellan cirka 3–20 Ω m och den inducerade polarisationen visar värden mellan cirka 0,005–3 millisekunder. Den flygburna resistivitetmätningen varierar mellan cirka 5–30 Ω m och markmätningen är nu mer i nivå med denna.

4 Diskussion

4.1 Resistivitet och inducerad polarisation

Markmätningarna som genomförts visar att deponin har en resistivitet som i huvudsak ligger mellan 400–600 Ω m men har också värden över 1000 Ω m. Förklaringen tros vara att deponin består delvis av schaktmassor och att marken var väldigt torr under tiden för mätningarna, i kombination med att grundvattennivån ligger delvis under deponin.

Att deponin har ett medeldjup på 2–2,5 meter och ett maxdjup på 5 meter (Ramböll, 2011a) korrelerar med de mätningar som har gjorts i beaktande till resistivitetsvärdena för Linje 2. Gällande Linje 1 och Linje 3 stämmer den tolkade utsträckningen av deponin inte lika bra överens med dessa värden. Detta kan bero på att resistivitetsmodellen skenbart förskjuter deponin längre ned än vad den egentligen är, att tolkningen av vad som utgör deponin är felaktig eller att deponin är djupare än vad Rambölls undersökningarna visar.

De högresistiva områdena utanför deponin är tolkat som ditlagda transportvägar använt av Torpa tegelbruk (Ramböll, 2009), som överensstämmer med de tidigare nämnda vallarna längs deponins sidor.

Marken som deponin är belägen på består av lera. Detta stämmer bra överens med de mätningar som har genomförts som visar på en låg resistivitet (0–40 Ω m) under och runtomkring deponin. I marken skall ett tunt lager av friktionsmaterial finnas, men detta syns inte på resistivitetsmodellerna, förmodligen på grund av att strömmen fortsätter att gå i leran då denna har en lägre resistans än friktionsmaterialet. Detta medför därmed en bild av ett djupare lerlager än vad som kan vara det verkliga fallet. Inga skikt eller linser av silt syns heller då dessa förmodligen är för små och/eller på för stort djup för att synas.

Det isolerade området i Linje 1 med högre resistivitet (Figur 15a) är tolkat som ett block i leran (Figur 15c). Det är inte tolkat som en del av deponin då det befinner sig på ett större djup än vad som är förväntat för deponin och material med lägre resistivitet som är tolkat som lera finns mellan detta område och deponin.

Då metallskrot har observerats vid den okulära undersökningen av deponin kan det misstänkas att detta metallskrot tillsammans med metaller begravt i deponin orsakar den högre inducerade polarisationen. Den inducerade polarisationen går ned på större djup än vad som kan förväntas, speciellt

gällande Linje 2, då deponins underyta är på max 5 meters djup (Ramböll, 2011a). Enligt T. Dahlin (personlig kommunikation, 13 maj 2019) kan strukturer med en hög effekt från inducerad polarisation ge en överdriven bild av djupet i modellen, vilket kan bero på att upplösningsförmågan avtar snabbare med djupet för inducerad polarisation än vad den gör för resistivitet. Vidare förklarar T. Dahlin att vid en hög effekt av inducerad polarisation kommer de yttligare delarna dominera mätdatan även om långa elektrodavstånd används. Detta med en kombination av att upplösningen blir sämre med längre elektrodavstånd gör det svårt att se en botten av zonen för den inducerade polarisationen.

Under fältmätningarna varnade mätinstrumentet för negativ resistivitet för både Linje 1 och Linje 2. Det kan då antas att detta fenomen förekommer omkring det område där de två linjerna korsar varandra. De korsar varandra där flest massor har deponerats, nära det dike som vetter mot älven (*Figur 11*). Den negativa resistiviteten tolkas som att marken är självledande, alltså att den har en självpotential. De metaller som finns i deponin kan ge en självpotential ifall objekten delvis är under grundvattennivån och delvis ovanför (Mussett & Khan, 2000 s. 205). De delar ovanför grundvattennivån blir oxiderade vilket leder till att en potentialskillnad bildas där ström flödar från hög till låg potential, med den låga potentialen ovanför grundvattenytan (s. 205). Vid aktiva mätningar av självpotential skulle resultatet av detta visa en negativ anomali (s. 205) och skulle denna negativa potentialskillnad sättas in i *Ekvation 2* fås ett negativt värde för resistiviteten. Självpotential kan även uppkomma där stora volymer lakvatten med hög konduktivitet rinner ned för deponiers stupande sidor (Coleman, 1991, refererad i Reynolds, 1997 s. 514) som ett resultat av skillnaden i joner mellan lakvattnet och grundvattnet, och/eller att en ström skapas när lakvattnet flödar ut från deponin (Reynolds, 1997 s. 514–516).

4.2 Lakvattenmätningar

Jämförs vattenproverna mot SGU:s (2013) riktvärden för grundvatten (*Tabell 4*) är det sulfat, koppar, nickel, kalcium, kalium och magnesium som har höga värden, medan zink, natrium och bor har något förhöjda värden.

Enligt SGU (2013) kan höga sulfathalter finnas i grundvatten som är i anslutning till deponier och det kan även komma från sulfidhaltiga bergschaktmassor. Torpadeponin består delvis av schaktmassor, vilket gör att det kan spekuleras kring om det kan finnas mycket sulfider i dessa. Från vissa bergarter kan även koncentrationerna av koppar, zink och nickel bli förhöjda, men det kan även komma från föroreningar. För deponier är även hög kaliumhalt vanligt, men kan också komma från gödselmedel (SGU,2013).

Vattenproverna visar inte på några förhöjda värden av ammonium och nitrat, vilket kan tolkas som att det inte har deponerats några signifikanta mängder hushållsavfall (SGU, 2013). Detta stämmer överens med resistivitetsvärdena för Torpadeponin som ligger mellan 100 till mer än 1000 Ωm (*Figur 15a till Figur 17a*), jämfört mot hushållsavfall som har en resistivitet mellan 10–50 Ωm (*Tabell 1*). De resistivitetsvärden som är uppmätta ligger inom intervallet för både byggnadsavfall och industriavfall som har resistivitetsvärden mellan 30–300 Ωm respektive 1–1000 Ωm (*Tabell 1*).

Konduktiviteten är något förhöjd men är ändå under det nationella riktvärdet för grundvatten som ligger på 75 mS/m (SGU, 2013). När konduktiviteten räknades om till resistivitet visar det att lakvattnet har ungefär samma resistivitet som leran, vilket kan göra det svårt att urskilja dem ifrån varandra.

Vattnets färg och turbiditet har höga värden, men detta ses som felaktigt då bottenlam blev suspenderat i vattnet under provtagningen eftersom vattennivån i lakvattenbrunnen var låg. Det kan då spekuleras kring ifall halterna av vissa ämnen har blivit högre än vad de borde vara, men då de flesta ämnena visar på väldigt

låga halter verkar det som att det inte har blivit någon betydande skillnad. Analysen av metaller i vattnet har även blivit filtrerat vilket innebär att metaller som kan ha suttit på detta botten slam är borttaget.

Värdena från mätningen i april 2019 jämfördes också mot tidigare värden från Ramböll utförda 2010 för att se om lakvattnet har förändrats över tid. Det som kan noteras är att de flesta ämnena har en liknande halt idag som för nio år sedan (*Tabell 5*). De enda ämnena som har en signifikant högre koncentration är turbiditet och färg. Detta kan ha sin orsak till att vattenståndet i brunnen var lågt och botten slam har blivit suspenderat i vattnet. En minskning av vissa ämnens koncentrationer kan dock ses. Detta kan tolkas som att deponin har blivit något urlakad. Koncentrationerna av aluminium och mangan har minskat mest, men även alkaliniteten och halten sulfat har minskat. Värt att nämna är att denna studies laboratorieanalys av lakvatten inte har utförts på samma sätt som Rambölls (2010). Lakvattenproverna för metaller har blivit filtrerade i denna studie medan Rambölls prover har blivit dekanterade. En filtrering innebär att alla partiklar filtreras bort innan analys, medan i ett dekanterat prov får partiklarna istället sedimenteras. Förändringar i koncentrationer kan även bero på väderförhållanden, då olika mycket regnvatten kan påverka halterna i lakvattnet.

4.3 Helikopterburen transient elektromagnetism

Längs med Göta älvs strandkant kan upplösningen av flygmätningarna ses (*Figur 18 & Figur 19*). Interpolationen följer inte älven helt, utan dess resistivitetvärden syns även över markens älvens sidor. Således bör markens resistivitet även synas i älven. Enligt Löfroth m.fl. (2018) blir modellen felaktig där det finns stora resistivitetsvariationer i sidled eftersom flygdatan gör antagandet att resistiviteten enbart varierar med djupet. Detta gör att flygmätningar fungerar sämre på exempelvis små lerområden omgivet av berg i dagen

(Löfroth m.fl., 2018) och leder till att det kan spekuleras kring ifall även deponier med för små dimensioner kan missas. För att komma runt problemet med små områden som visar på stora resistivitetskontraster kan en teknik som tillåter en modellering av två dimensioner behöva utvecklas.

Ytterligare problem med att avgränsa Torpadeponin med flygmätningar är att inga mätpunkter finns längs med väg E45 som går öster om deponin (*Figur 13*). Det är nämligen inte tillåtet att flyga över bebyggelse och trafikerade vägar (Löfroth m.fl., 2018). Därför kan det spekuleras kring huruvida Torpadeponin hade blivit synlig om den inte låg så nära E45:an. Det utfördes dock tester med att inte använda de mätpunkter som finns öster om vägen och även använda endast de punkter som korsar deponin vid interpolationen, men resultaten förblev ungefär desamma.

Mot älven syns från flygmätningarna ett område mellan lakvattenbrunnarna som har låga resistivitetvärden på 0–20 Ωm (*Figur 18 till Figur 20*), vilket stämmer väl överens med mätningarna av lakvattnets konduktivitet som räknades om till en resistivitet på 14 respektive 16 Ωm . Det är dock svårt att dra en slutsats ifall detta är lakvatten då leran i området har samma resistivitet.

4.3.1 Helikopterburen transient elektromagnetism jämfört mot markmätningar

I diagrammen för mätvärdena på 1,5 och 5,5 meters djup (*Figur 21 & Figur 22*) syns det hur resistiviteten från markmätningarna har en högre variation än flygmätningarna, medan de olika mätningarna visar på liknande värden utanför det skuggade området i diagrammen och på ett djup av 10 meter (*Figur 23*). Det visar på att de olika mätmetoderna ger liknande resultat över ett homogent område, men att markmätningarna har en högre upplösning än flygmätningarna där skarpa kontraster finns.

Storleken på den SkyTEM-antenn som användes under flygmätningarna har en area på 340 kvadratmeter, vilket innebär att ett medelvärde för den transienta elektromagnetiska datan (och därmed resistiviteten) över minst ett så stort område kommer ges för varje mätpunkt (P. Gisseloe, personlig kommunikation 15 maj 2019). Detta kan ge en för dålig upplösning för att kunna se Torpadeponin, men det är viktigt att påpeka att det är fler faktorer som spelar in på hur bra upplösningen för flygmätningar blir. De översta 30 meterna i marken kan få en horisontell upplösning ned till 1 meter givet att resistivitetskontraster mellan marklagerna finns (P. Gisseloe, personlig kommunikation), men några resistivetsvariationer inom deponin är ändå inte något som syns trots att den har en högre resistivitet än underliggande lerlager. Det kan diskuteras huruvida en mindre sändarram skulle kunna ge en högre upplösning. Om ett medelvärde tas på en mindre area skulle också små områden kunna detekteras. Avgränsning av deponier skulle då kunna fungera bättre med denna flygburna metod. En mätteknik specialanpassad för små strukturer skulle kunna utföras med drönare. Då kan deponier och andra små områden med stora resistivetskontraster registreras bättre. Helikopterburen mätteknik fungerar bra för att täcka stora områden där olika delar av den registrerade datan kan tas ut för olika ändamål. Är dock ändamålet en deponi eller annat platsspecifikt område kan drönare vara ett bra alternativ då mätnoggrannheten är viktigare än storleken på det uppmätta området.

Under deponin består marken av lera vilket passar bra in med de uppmätta värdena från både markmätningarna och flygmätningarna som visar värden på 3–30 Ωm (Figur 23). Där deponin ska vara belägen i diagrammet på 1,5 meters djup (Figur 21) är det inget som indikerar på att en deponi skulle kunna befinna sig där enligt data från flygmätningarna. Dock är det värt att notera det faktum att resistiviteten från flygmätningarna är högre på det djup som deponin befinner sig på (Figur 21) än vad den är på ett större djup (Figur 23). Detta kan grunda sig i att flygmätningarna faktiskt plockar upp den högre resistiviteten som deponin innehåller, men då upplösningen ej

är tillräcklig tas värden från de omkringliggande lagren också upp i samma mätning. Med andra ord tar flygmätningarna ett medelvärde på den högsta möjliga upplösningen, som har diskuterats i föregående stycke. Något som också kan nämnas är att flygmätningarna tar ett medelvärde från ett djupintervall (exempelvis 0–1 meter) medan markmätningen skapar punkter med data på ett specifikt djup. Detta kan innebära att deponins utsträckning i djupled kan vara för litet för att registreras.

5 Slutsats

Torpadeponin kan ej avgränsas med hjälp av helikopterburen transient elektromagnetism med aktuell mätkonfiguration och flyghöjd. Detta beror sannolikt på att deponin är för liten för att ge utslag med aktuell kontrast mellan deponerade massor och omgivande samt underliggande geologi.

Lakvatten är inget som detekteras i de resistivetsmodeller som tagits fram från de markbundna mätningarna. Detta förklaras av att kontrasten mellan lakvattnet och den omgivande leran är för liten för att detekteras. Troliga lakvatteneffekter kan anas mellan lakvattenbrunnarna från de flygburna mätningarna.

I jämförelse med tidigare lakvattenmätningar (Ramböll, 2010) ses en generell minskning av föroreningar. Sulfathalten är dock fortsatt hög vilket tros bero på schaktmassor. Låga halter av ammonium och nitrat är något som observeras. Detta kan ha sin grund i att inga stora mängder hushållsavfall har deponerats och är något som stämmer överens med resistivetsvärdena för deponin. Vidare kan det observeras att deponin ligger inom de resistivetsvärden för byggnadsavfall samt industriavfall. Dock kan ingen slutsats dras kring det exakta innehållet av deponin.

Ett förslag för vidare studier är att undersöka en större deponi som har en stor resistivetskontrast gentemot dess omgivning och som inte ligger nära en väg eller annat

område där datapunkter inte kan tas med. För att både lakvatten och deponi ska ha en stor resistivetskontrast gentemot sin omgivning föreslås en deponi med låg resistivitet som är placerad i en omgivning med en relativt hög resistivitet, exempelvis sand, för att kunna urskilja både lakvatten och deponi.

För att utveckla ett mätupplägg med helikopterburen transient elektromagnetism som bättre kan se deponier föreslås en sändarram av mindre storlek än den som har använts i denna undersökning. En mindre sändarram skulle ta ett medelvärde från ett mindre område och därmed kunna plocka upp fler mindre anomalier. Flygmätningarna behöver, särskilt med en mindre ram, utföras på så låg höjd som möjligt. Detta skulle kunna utföras med en specialanpassad mätteknik där drönare används för att registrera små strukturer. Vidare föreslås en teknik som kan skapa en resistivetsmodell i två dimensioner som därmed inte gör antagandet att markens resistivitet endast varierar i djupled.

Tack

Tack vill riktas till våra handledare Prof. Erik Sturkell (Göteborgs Universitet) och Dr. Martin A. Persson (COWI) för stöttning och kloka råd under arbetets gång. Tack till Dr. Mats Olvmo som fungerat som examinerator och som har hjälpt oss förbättra detta arbete. Vidare riktas tack till Dr. Lena Persson (SGU) för tillgång till SkyTEM-data och till Dr. Per Gisseloe (SkyTEM Survey ApS) som gav oss en djupare förståelse för hur SkyTEM fungerar. Andra vi vill tacka är Prof. Torleif Dahlin (Lund Universitet) för hjälp med inducerad polarisation, Dr. Magnus Hellqvist (Geoveta, gästlärare på Göteborgs Universitet) för hjälp med miljöfrågor och Dr. Markus Giese (Göteborgs Universitet) för hjälp med lakvattensutrustning. Tack riktas även till Linn Schenholm (Ramboll), Christian Karlsson och Emelie Waslund Pérez (Trollhättans kommun) som hjälpt oss med rapporter och underlag för Torpadeponin. Stort tack till Rune Karlsson som lät oss utföra våra studier på hans mark och upplyste oss om information kring Torpadeponin. Till sist vill vi tacka våra klasskamrater Johanna Winberg, Frida Elf och Viktor Lundstedt som granskat vår text och Björn Salbom som hjälpte till under en av fältdagarna.

Referenser

- ABEM (2016) *ABEM Terrameter LS: Instruction Manual*. Sundbyberg: ABEM Instruments AB
- Dahlin, T., Leroux, V., & Rosquist, H. (2010). Resistivity-IP for landfill applications. *First Break*, 28(8), 101-105
- Dahlin, T., & Loke, M. H. (2015). Negative apparent chargeability in time-domain induced polarisation data. *Journal of Applied Geophysics*, 123, 322-332. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.08.012
- Fredén, C. (1984). *Beskrivning till jordartskartan Vänersborg SO*. (Ae, 48). Uppsala: Sveriges geologiska undersökning.
- Gazoty, A., Fiandaca, C., Pedersen, J., Auken, E., Christiansen, A. V., Pedersen, J. K. (2012). Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 1793-1804.
- Giacheti, H. L., Modelli, G., Boscov, M. E., Elis, V. R., & Hamada, J. (2007). Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal waste disposal site in Brazil. *Environmental Geology*, 52, 871-887.
- Guerin, R., Munoz, M. L., Aran, C., Laperrelle, C., Hidra, M., Drouart, E., Grellier, S. (2004). Leachate recirculation: Moisture content assessment by means of geophysical technique. *Waste Management*, 24(8), 785-794
- Göta älvs vattenvårdsförbund (2015). *Fakta om Göta Älv – En beskrivning av Göta älv och dess avrinningsområde nedströms Vänern 2015* Göteborg: Göta älvs vattenvårdsförbund
- Göransson, G., Bendz, I. & Larson, D. (2009). Combining landslide and contaminant risk: A preliminary assessment. *Journal of Soils and Sediments*, 9(1), 33-45.
- Hack, R. (2000). Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics* 21, 423-428
- Hite, L. (2003). A Review of Surface Geophysical Techniques as a Tool for Environmental Investigations. *Environmental Claims Journal*, 15(2), 261-268. DOI: 10.1080/713609449
- Klingberg, F., Påsse, T., & Levander, J. (2006). *Bottenförhållanden och geologisk utveckling i Göta älv* (K 43). Uppsala: Sveriges geologiska undersökning.
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Linköping: Statens Geotekniska Institut
- Ljungdahl, J. & Bouvier, V. (2012) *The possibility to locate heavy metal contaminations with geophysical surveys* (Kandidatuppsats) Göteborg: Institutionen för geovetenskaper, Göteborgs Universitet. Hämtad från: https://studentportal.gu.se/digitalAssets/1393/1393736_b723-klar.pdf
- Loke, M. H., Acworth, I., Dahlin, T., (2001). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys, *ASEG Extended Abstracts*, 2001(1), 1-4. DOI: 10.1071/ASEG2001ab075
- Loke, M. H., (2018). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.

- Lundqvist, I. (1997). *Beskrivning till berggrundskartan. Vänersborg SO. (Af, 160)*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning.
- Löfroth, H., Persson, L., Bastani, M., Rodhe, L., Hedfors, J., With, C., ... Engdahl, M. (2018). *Tillämpning och utvärdering av metoder för kartläggning av kvicklera*. Linköping: Statens geotekniska institut.
- Milsom, J., & Eriksen, A. (2011). *Field geophysics* (4th ed., Geological field guide series). Oxford: Wiley-Blackwell.
- Mussett, A., & Khan, M. (2000). *Looking into the earth: An introduction to geological geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Naturvårdsverket. (2008). *Lakvatten från deponier*. Stockholm: Naturvårdsverket.
- Ramböll (2008). *Anmälan enligt 9 kap miljöbalken. Torpa deponi*. Göteborg: Ramböll Sverige AB.
- Ramböll (2009). *Torpadeponin – täckningsåtgärder. Rapport förundersökningar för täckningsåtgärder*. Göteborg: Ramböll Sverige AB.
- Ramböll (2010). *Torpadeponin – projektering. Rapport Fältdag 1*. Göteborg: Ramböll Sverige AB.
- Ramböll (2011a). *Torpa deponin – projektering. Sammanfattande rapport för Torpadeponin*. Göteborg: Ramböll Sverige AB.
- Ramböll (2011b). *Torpa deponin – projektering. Fördjupad provtagning*. Göteborg: Ramböll Sverige AB.
- Reynolds, J. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester: Wiley.
- SGI. (2018-10-30). *Nedlagda deponier*. Hämtad 2019-04-24, från <http://www.swedgeo.se/sv/vagledning-i-arbetet/deponi/nedlagda-deponier/>
- SGU. (2013). *Bedömningsgrunder för grundvatten*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning.
- Slater, L.D., Lesmes, D. (2002). IP interpretation in environmental investigations. *Geophysics*, 67(1), 77-88. DOI: 10.1190/1.1451353
- Stevens, R.L. & Hellgren, L-G. (1990). A generalized lithofacies model for glaciomarine and marine sequences in the Göteborg area, Sweden. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 112(2), 89-105. DOI: 10.1080/11035899009453166
- Sorensen, K.I. & Auken, E. (2004). *SkyTEM-a New High-resolution Helicopter Transient Electromagnetic System*. *Exploration Geophysics*, 35(3), 194-202. DOI: 10.1071/EG04194.
- Vägverket (2008). *Väg E45 Älvängen-Stallbacka, delen bro över Slumpån. Rapport Geoteknisk Undersökning*.
- Öman, C., Malmberg, M. & Wolf-Watz, C. (2000). *Handbok för lakvattenbedömning. Metodik för karakterisering av lakvatten från avfallsupplag*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet AB.

Referenser GIS-data

Översiktskarta (Figur 1)

GSD-Översiktskartan vektor, © Lantmäteriet (2013).

GSD-Ortnamn, © Lantmäteriet (2017).

LST Potentiellt förorenade områden externt (EBH), © Länsstyrelserna (2017).

World Light Grey Canvas Base - Esri, HERE, Garmin, © OpenStreetMap contributors, and the GIS user community.

Studieområde (Figur 4)

GSD-Ortofoto, © Lantmäteriet (2015).

GSD-Fastighetskartan vektor, © Lantmäteriet (2017).

Studieområde, historiska bilder (Figur 5)

Ortofoton, © Lantmäteriet, hämtade från Ramböll (2009).

Studieområde, SGU (Figur 7)

Jordartskarta, ©Sveriges Geologiska Undersökning

Jorddjupskarta, © Sveriges Geologiska Undersökning

Mätlinjer (Figur 11)

GSD-Ortofoto, © Lantmäteriet (2015).

Lakvattensystem (Figur 12)

GSD-Ortofoto, © Lantmäteriet (2015).

Studieområde, flygmätningar (Figur 13)

GSD-Ortofoto, © Lantmäteriet (2015).

SkyTEM-data, © SGU.

Interpolerad resistivitet från flygmätningar (Figur 18 till Figur 20)

GSD-Höjddata, grid 2+, © Lantmäteriet (2016).

SkyTEM-data, © SGU.

Bilaga 1



Eurofins Environment Testing Sweden AB
Box 737
531 17 Lidköping

Tlf: +46 10 490 8110
Fax: +46 10 490 8051

Göteborgs Universitet
Erik Sturkell
Guldhedsgatan 5A
42320 GÖTEBORG

AR-19-SL-080609-01

EUSELI2-00627542

Kundnummer: SL8434742

Analysrapport

Provnnummer:	177-2019-04100699	Ankomsttemp °C	11		
Provbeskrivning:		Provtagningsdatum	2019-04-09 14:30		
Matris:	Lakvatten	Provtagare	Tobias Möhl/Fanny Ekström		
Provet ankom:	2019-04-10				
Utskriftsdatum:	2019-04-23				
Provmärkning:	TORPA				
Analys	Resultat	Enhet	Måto.	Metod/ref	
Vattentemperatur vid provtagning	5.1	°C			c)*
Turbiditet	210	FNU	20%	SS-EN ISO 7027-1:2016	b)
Färg (410 nm)	340	mg Pt/l	20%	SS-EN ISO 7887:2012 del C	b)
Suspenderade ämnen	570	mg/l	10%	SS EN 872:2005	b)
pH	7.4		0.2	SS-EN ISO 10523:2012	b)
Temperatur vid pH-mätning	22.5	°C		SS-EN ISO 10523:2012	b)
Alkalinitet	160	mg HCO ₃ /l	10%	SS EN ISO 9963-2:1996	b)
Konduktivitet	62	mS/m	10%	SS-EN 27888:1994	b)
Klorid	23	mg/l	10%	SS-EN ISO 10304-1:2009	b)
Sulfat	120	mg/l	20%	SS-EN ISO 10304-1:2009	b)
Fluorid	0.39	mg/l	20%	SS-EN ISO 10304-1:2009	b)
Syre (O ₂)	2.9	mg/l	10%	SS-EN 25813:1993	b)
Syremättnad	23	%		SS-EN 25813:1993	b)
TOC	7.6	mg/l	20%	SS EN 1484:1997	b)
DOC	3.5	mg/l	20%	SS EN 1484:1997	b)
Biokemisk syreförbrukning BOD ₇	< 3.0	mg/l	30%	SS EN 1899 1-2:1998 / ISO 17289:2014 (E)	b)
Ammoniumkväve (NH ₄ -N)	0.023	mg/l	15%	SS-EN 11732:2005	b)
Fosfatfosfor (PO ₄ -P)	0.028	mg/l	30%	SS-EN ISO 6878:2005	b)
Nitratkväve (NO ₃ -N)	< 0.10	mg/l	20%	SS 028133:1991 mod	b)
Nitrit-nitrogen (NO ₂ -N)	< 0.0020	mg/l	15%	SS EN 26777:1993 mod	b)
Fosfor P	0.89	mg/l	10%	SS-EN ISO 15681-2:2005	b)
Kväve-N	1.0	mg/l	10%	ISO 29441:2010	b)
Natrium Na (filtrerat)	21	mg/l	15%	SS-EN ISO 17294-2 utg 1 mod	a)
Kalium K (filtrerat)	16	mg/l	15%	SS-EN ISO 17294-2 utg 1 mod	a)
Kalcium Ca (filtrerat)	67	mg/l	15%	SS-EN ISO 17294-2 utg 1 mod	a)

Förklaringar

AR-003v48

Laboratoriet/laboratorierna är ackrediterade av respektive lands ackrediteringsorgan. Ej ackrediterade analyser är markerade med *

Mätosäkerheten, om inget annat anges, redovisas som utvidgad mätosäkerhet med täckningsfaktor 2. Undantag relaterat till analyser utförda utanför Sverige kan förekomma. Ytterligare upplysningar samt mätosäkerhet och detektionsnivåer för mikrobiologiska analyser lämnas på begäran.

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utförande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Resultaten relaterar endast till det insända provet.

Sida 1 av 2

AR-19-SL-080609-01

EUSELI2-00627542

Järn Fe (filtrerat)	0.0014	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Magnesium Mg (filtrerat)	22	mg/l	15%	SS-EN ISO 17294-2 utg 1 mod	a)
Mangan, Mn (filtrerat)	0.063	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Aluminium Al (filtrerat)	0.0071	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Antimon, Sb (filtrerat)	0.00016	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Arsenik As (filtrerat)	0.00021	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Barium Ba (filtrerat)	0.070	mg/l	25%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Beryllium Be (filtrerat)	< 0.00010	mg/l	15%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Bly Pb (filtrerat)	< 0.000010	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Bor B (filtrerat)	0.14	mg/l	25%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Fosfor, P (filtrerat)	< 0.30	mg/l	20%	SS-EN ISO 11885 utg 2 mod	a)
Kadmium Cd (filtrerat)	0.000066	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Kisel, Si (filtrerat)	6.5	mg/l	15%	SS-EN ISO 17294-2 utg 1 mod	a)
Kobolt Co (filtrerat)	0.00059	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Koppar Cu (filtrerat)	0.0011	mg/l	25%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Krom Cr (filtrerat)	0.000055	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Litium, Li (filtrerat)	0.051	mg/l	15%	SS-EN ISO 11885 utg 2 mod	a)
Molybden, Mo (filtrerat)	0.0012	mg/l	25%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Nickel Ni (filtrerat)	0.0080	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Selen, Se (filtrerat)	< 0.00050	mg/l	30%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Silver Ag (filtrerat)	< 0.000010	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Strontium, Sr (filtrerat)	0.32	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Svavel, S (filtrerat)	50	mg/l	15%	SS-EN ISO 11885 utg 2 mod	a)
Tallium, Tl (filtrerat)	< 0.000010	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Tenn Sn (filtrerat)	< 0.00010	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Titan, filtrerat	< 0.050	mg/l	10%	SS-EN ISO 11885 utg 2 mod	a)
Uran, U (filtrerat)	0.00084	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Vanadin V (filtrerat)	0.000075	mg/l	20%	EN ISO 17294-2:2016	a)
Zink Zn (filtrerat)	0.050	mg/l	25%	EN ISO 17294-2:2016	a)

Utförande laboratorium/underleverantör:

- a) Eurofins Environment Testing Sweden AB, SWEDEN
- b) Eurofins Water Testing Sweden, SWEDEN
- c) Uppgift från provtagare

Kopia till:

gusekstrfa@student.gu.se (gusekstrfa@student.gu.se)
gusmohto@student.gu.se (gusmohto@student.gu.se)

Paola Nilson, Rapportansvarig

Denna rapport är elektroniskt signerad.

Förklaringar

AR-003v48

Laboratoriet/laboratorierna är ackrediterade av respektive lands ackrediteringsorgan. Ej ackrediterade analyser är markerade med *

Mätosäkerheten, om inget annat anges, redovisas som utvidgad mätosäkerhet med täckningsfaktor 2. Undantag relaterat till analyser utförda utanför Sverige kan förekomma. Ytterligare upplysningar samt mätosäkerhet och detektionsnivåer för mikrobiologiska analyser lämnas på begäran.

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utförande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Resultaten relaterar endast till det insända provet.

Sida 2 av 2