



Karaktärisering av deponier samt detektering av deponigas med geofysiska metoder

(Characterisation of landfills and detection of landfill gas by geophysical methods)

**Håkan Rosqvist, Sara Johansson, Torleif Dahlin, Mats Svensson,
Carl-Henrik Månsson, Virginie Leroux, Magnus Lindsjö**

Svenskt Gastekniskt Center AB, SGC

Förnybara energigaser såsom biogas ses alltmer som centrala i den stora utmaning samhället står inför vad gäller omställningen från ett fossilt till ett förnybart energisystem. Särskilt stor är utmaningen inom transportsektorn där också energigaserna utgör ett mycket attraktivt alternativ. Genom kollektivforskningsprogrammet *Energigastekniskt utvecklingsprogram* kanaliseras SGC medel från Energimyndigheten under perioden 090401–130331 att fördelas på olika programområden. Programverksamheten är uppdelad i fem områden och leds av varsin programansvarig person på SGC. Programområdena är *Biogasteknik, Förgasning och Metanisering, Distribution och Lagringsteknik, Energigas användning/Miljö och Gasformiga drivmedel*. Myndighetsbeslut om Energimyndighetens medfinansiering i projekt fattas av den externa *Beslutsnämnden*.

Energimyndighetens syfte Energigastekniskt utvecklingsprogram är "*att stärka kunskap och erfarenheter av gasformiga bränslen och dess användning*". Detta ska ske genom forskning, utveckling och demonstration. Projekt inom ramen för kollektivforskningsprogrammet redovisas i SGC:s rapportserie och görs allmänt tillgängliga. SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller dylikt i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan. En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC:s hemsida www.sgc.se.

För den som vill skaffa sig en överblick över kunskapsläget om energigaser, deras framställning, användning etc. hänvisas till publikationsserien GasAkademin där handböcker finns inom områdena Energigasteknik, Industriell energigasteknik, Energigaser och miljö, Energigaser – En översikt, Energigaser – Regelverk och standarder, Gasers egenskaper, Gasanvändning i bostäder och lokaler, Energigaser – Produktion, transport och lagring samt Gasdrift av fordon. För mer information hänvisas till www.gasakademin.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB med säte i Malmö bildades år 1990. Bolaget koordinerar forskning, utveckling och demonstration inom energigasområdet. SGC ägs av Energigas Sverige, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi-koncernen AB (publ) och Öresundskraft AB.

Det här projektet har finansierats av Sven Tyréns Stiftelse, Avfall Sverige, NSR AB, LTH och Energimyndigheten.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Martin Ragnar
Verkställande direktör

Förord

Projektet *Användning av geofysik för karakterisering av innehåll samt detektering av gas i deponier – MaLaGa-projektet, Fas 2, Steg 1–4* har drivits som ett samarbetsprojekt mellan Institutionen för Teknisk geologi, Lunds Tekniska Högskola, Tyréns, NSR AB och Rosqvist Resurs AB. Projektet startades i oktober 2009 och avslutades i augusti 2012.

Till projektet har en referensgrupp funnits knuten bestående av följande personer;

- Staffan Karlsson, Jörgen Held, och Martin Ragnar, SGC
- Peter Flyhammar, Avfall Sverige
- Staffan Salö, Sysav Utveckling AB
- Irene Bohn, NSR AB

Författarna vill tacka Martin Ragnar på SGC, Irene Bohn på NSR AB och Peter Flyhammar på Avfall Sverige för värdefulla kommentarer i samband med granskningen av denna rapport.



Summary

This report describes the *Malaga project Phase 2*, which is a continuation of the in 2009 completed and reported the development project (*MaLaGa project Phase 1*). Based on the results of *Phase 1*, the main purpose of *Phase 2* was to further develop geo-electrical methods for better understanding of the conditions below the surface of the landfill. The geo-electrical methods used were mainly resistivity and induced polarization (IP). The acronym MaLaGa stands for the full project designation "Mapping of Landfill structures and Gas migration based on geophysical measurements".

The purpose of the MaLaGa project Phase 2 was to improve the understanding of underground conditions in landfills and to develop a methodology based on geophysical methods. A further aim was to improve the understanding of the impact of material parameters on sub-surface processes such as movement of gas and water in landfills (e.g. pore pressure, temperature, soil moisture and ion content), as well as to characterize the internal content and structure of landfills. The project therefore also aimed for a better exploitation of the energy potential of the landfill gas and a reduction of the leakage of climate gases to the atmosphere. A reduction of the pollution of water resources through a better understanding of the presence and dynamics of the water inside landfills is another aim of the project.

The implementation of Phase 2 has been divided into four steps, where Step 1 was an analysis of existing data generated in Phase 1. In Step 2 and 3 analysis of new field measurements at different scales were performed. In Step 4, the developed measurement methodologies were tested in full scale on three reference landfills.

Step 1 consisted of a deeper analysis of the combination resistivity –IP (induced polarization) of up to now unused data from the field measurements during Phase 1.

The purpose of Step 2 was to conduct an in-depth study of the possibilities to detect gas in landfills through field experiments in small-scale investigation areas. The implementation had a clear focus on geo-electrical methods and how other information can complement the interpretation of the geophysical measurements. Examples of other information are temperature, pore pressure and soil moisture. The resistivity measurements were performed with the ABEM-Lund Imaging System which, controlled via a modem, automatically measured a complete 3D data set every second hour during several weeks in December 2009. Simultaneously, a large data set of gas fluxes was collected with the static chamber method. In addition, also laser measurements of gas emission at the soil surface and gas concentration in the soil was measured.

The main purpose of Step 3 was to develop a stepwise methodology for geophysical measurements at landfills. The methodology is based on measurements with geophysical methods for different applications and on different field scales. Large-scale (around 1 ha) geophysical field measurements have been performed during Step 3, with 5 main aims:

1. Localization of landfill borders
2. Internal content and structure of landfills
3. Zones that indicate gas presence



4. The ground water level
5. Distribution and status of final cover

The geophysical methods used in Step 3 were, in addition to resistivity and IP, measurements with CMD (ground conductivity meter), magnetometry as well as refraction- and surface wave seismic.

In Step 4, a few landfill owners were invited to join the project through usage of their landfills as a reference landfill. Three landfills were selected for a limited but full scale measurement program. The aim of these measurements was to test the preliminarily developed methods in a more project-like form, and to share knowledge of the technology.

The resistivity measurements were throughout the project made with the pole-dipole configuration, which in comparison to other electron configurations provides both good resolution and depth penetration of the resulting data.

Results from Step 1 and 2 shows that a comparison of measurements in exactly the same field spot at two different occasions, summer 2008 (Phase 1) and winter of 2009 (Phase 2), showed interesting seasonal variations regarding both resistivity measurements and soil conditions. The depth penetration of the resistivity measurements is lower during winter 2009 due to higher conductivity in soil compared to summer 2008. The shallow structures are therefore most distinct 2009. A compost wall at some depth below the soil surface, which was clearly distinguishable 2008, was not as clearly detected 2009. However, indications of the compost wall are seen in the 2009 data when the change in resistivity over time is visualized instead of the resistivity distribution at a given time step. It was concluded that the geo-electrical variations over time are related to the freezing of the ground (higher resistivity), rain and infiltration of water into the ground (lower resistivity), and the gas content in the soil (higher resistivity).

Furthermore, a clear correlation exists between anomalies with high resistivity and gas flow at the surface. Also measurements of gas concentrations 20cm below the soil surface, performed by research colleagues at Hamburg University, correlated well with the resistivity distribution. It was shown that in both summer and winter heavy precipitation seem to be the factor that plays the biggest role in the emission rate of landfill gas from the surface. It could be concluded that the results from MaLaGa Phase 2 has clearly indicated that gas presence in landfills can be detected with resistivity.

Moreover, during the large-scale measurements in Step 3, resistivity and IP (and normalized IP) gave a good idea of the internal structure of landfills and distinct mapping of the final cover could be performed. The lateral resistivity distributions showed a confident correlation with the measurements performed with the CMD-instrument (ground conductivity meter). CMD is a considerably faster method, but results in a lateral map in contradiction to resistivity and IP where the results can be presented as a 3D-volume. Therefore CMD measurements could for example be useful for an initial mapping of a larger area to select areas of interest for more detailed resistivity measurements. Here, the CMD mapping and large-scale resistivity measurements were used to identify a high-resistivity area which indicated gas presence. Resistivity in combination with refraction seismic gave a consistent interpretation of water table position. The results of the surface wave seismics were more difficult to interpret, but can possibly be used to distinguish the soil



cover from the waste material and provide rough indications of shear wave velocity and shear modulus of the material. The magnetic field strength resulting from the magnetometry mapping indicated that different types of waste could be identified. An anomaly with high field strength appeared over municipal waste, while the location of industrial waste coincided with low magnetic field strength.

In Step 4, time-laps resistivity measurements were performed at a reference landfill in Trelleborg (owned by SYSAV) aiming to study the impact on soil resistivity of gas wells being turned on and off. The measurements provided successful results showing an increase in resistivity in areas close to an active gas well, especially when all gas wells had been turned off for a longer period before. The results illustrated the importance of disturbed gas pressure balance on the gas dynamics in the soil.

The second reference landfill in Step 4 was located in Halmstad and owned by Stena Metall. The aim was to investigate possibilities to distinguish three different material types with resistivity-IP, magnetometry and CMD in an artificially constructed hill. The results were successful, and showed that 3D-visualisations with resistivity-IP provided the most evident results, although also the lateral maps of magnetic field strength as well as magnetic susceptibility from the CMD measurements also indicated differences between the material types.

The investigations at the third reference landfill in Vetlanda (owned by VETAB), is ongoing when this report is written (spring 2012), and is therefore not presented here. The objective here is to detect ground water levels and dispersion of pollution in ground water.

Communication of results has been given high priority during Phase 2, therefore peer reviewed scientific papers, reports and conference papers have been published during the project implementation. The project organized a second international workshop during 16-17 February 2012 - *Second workshop on geophysical measurements in waste management*. The first workshop was held in Phase 1, in November 2008. Approximately 20 persons from 6 different countries participated in the second workshop. In order to achieve a more efficient communication the MaLaGa project has published a website (www.malagageophysics.blogspot.com).



Sammanfattning på svenska

I denna rapport beskrivs MaLaGa-projektet *Fas 2* som är en fortsättning på det under 2009 avslutade och rapporterade utvecklingsprojektet *Användning av geofysik för detektering av gas i deponier (Fas 1)*. Baserat på resultaten från *Fas 1* har huvudsyftet med MaLaGa-projektet *Fas 2* varit att vidarutveckla geoelektriska mätmetoder för bättre förståelse av förhållanden under markytan på deponier. De geoelektriska mätmetoder som använts har i huvudsak varit resistivitet och inducerad polarisation (IP), men även andra geofysiska metoder har utvärderats, dessa har varit seismik, stångsligram samt magnetometri.

Syftet med MaLaGa-projektet *Fas 2* har varit att vidareutveckla förståelsen för förhållanden under mark i deponier samt att utveckla en metodik som baseras på användning av flera geofysiska metoder. Ett ytterligare syfte har varit att utveckla förståelsen för andra materialparametrars inverkan på processer för att bättre förstå förekomst och rörelser av gas och vatten i deponier på detaljnivå (t.ex. portryck, temperatur, fukthalt och joninnehåll), samt för att karakterisera innehåll och uppbyggnad av deponier. Projektet har därmed också syftat till att bättre kunna utnyttja energipotentialen i deponigasen och att minska läckage av klimatgaser till atmosfären, samt att minska föroreningsbelastningen till vattenresurser genom en bättre förståelse av vattens förekomst och rörelser i deponier.

Genomförande av MaLaGa-projektet *Fas 2* har delats in i fyra steg, där *Steg 1* har inneburit analys av befintlig data som genererades i *Fas 1*, *Steg 2* och *Steg 3* har inneburit analys av nya fältmätningar i olika skalor. I *Steg 4* har en mätmetodik testats i fullskala på tre referensdeponier. Syftet med dessa mätningar har varit att utveckla och testa preliminärt framtagna metodik i mer uppdragslik form, samt för att sprida kunskap om tekniken.

Steg 1 innebar en fördjupad analys av kombinationen resistivitet- och IP från fältmätningarna under *Fas 1*. Hittills utnyttjad mätdata från *Fas 1* i projektet har utvärderats med avseende på kombination av resistivitet och IP.

Syftet med Steg 2 var att genomföra en fördjupad studie av möjligheterna att detektera gas i deponier genom fältförsök i mindre skala, det vill säga, i samma skala som mätningarna genomfördes under *Fas 1*. Genomförandet har haft ett tydligt fokus på kombination av geoelektriska metoder, och på hur annan information kan komplettera de geofysiska mätningarna. Exempel på annan information är temperatur, portryck, fukthalt, och kemin i marken.

Huvudsyftet med Steg 3 har varit att utveckla en stegvis metodik för geofysiska mätningar på deponier i full skala. Metodiken bygger på mätningar med olika geofysiska mätmetoder för olika tillämpningar och i olika skalor. Under Steg 3 har storskaliga (cirka 1 ha) geofysiska fältmätningar genomförts med i huvudsak fem syften:

1. Lokalisering av deponiers utbredning
2. Innehåll och inre struktur i deponier
3. Zoner som indikerar gasförekomst
4. Grundvattenytans läge
5. Sluttäckning, utbredning och status



Inom steg 4 har ett fåtal deponiägare erbjudits ett deltagande i projektet där deras deponi har använts som en referensdeponi. Tre deponier har valts ut för ett begränsat mätprogram i fullskala. Syftet med dessa mätningar är att testa den preliminärt framtagna metodik i Steg 3 i en mer uppdragslik form, samt för att sprida kunskap om tekniken.

Kommunikation av resultat har prioriterats högt under Fas 2. Det innebär att ett flertal vetenskapliga artiklar, rapporter och konferensbidrag har publicerats under projektets genomförande. Inom ramen för projektet anordnades en andra internationell workshop i Malmö, den 16–17 februari 2012 – *Second workshop on geophysical measurements in waste management*. Den första workshopen anordnades inom MaLaGa-projektet Fas 1, i november 2008. Vid den andra workshopen närvarade cirka 20 personer från sex länder. För att åstadkomma en effektivare kommunikation har MaLaGa-projektet även publicerat en hemsida (www.malagageophysics.blogspot.com).

Vid en jämförelse av mätningar på exakt samma fältlokal vid två olika tillfällen, sommaren 2008 och vintern 2009, kan intressanta årstidsberoende med avseende på både resistivetsmätningar och markförhållanden konstateras. På grund av högre konduktivitet i marken under vintern 2009 jämfört med sommaren 2008 är djupnedträngningen på resistivetsmätningarna mindre. De ytliga strukturerna är tydligast. En kompostvall som syntes tydligt 2008 är inte lika tydlig 2009 då man visualiserar resistivetsdistributionen. Dock syns indikationer på kompostvallen när olika dataset jämförs över tid. Variationerna över tid är troligen starkt kopplade till frysning av marken (ökad resistivitet), regn och infiltration av vatten i marken (minskad resistivitet), samt gasinnehåll i marken (ökad resistivitet).

Resultat från MaLaGa Fas 2 har tydligt visat indikationer på att man kan detektera gas med resistivitet. De tydligaste resultaten i data från Steg 2 syns i de generella rumsliga skillnaderna i dataseten. Resultaten framtagna av forskarkolleger vid Hamburgs universitet visar att gaskoncentrationerna 20cm under markytan korrelerar väl med resistivetsdata i samma område.

De tydligaste slutsatserna som kan dras av resultaten som genererats i projektet är följande:

- Ett tydligt samband finns mellan anomalier med hög resistivitet och gasflöde vid markytan samt metankoncentration i marken.
- Markens resistivitet beter sig på olika sätt beroende på säsong. Då variationerna över tid är stora och svårtolkade på vintern, är de mindre och lättare att koppla till variationer i vädret under sommaren.
- Under både sommar och vinter verkar kraftig nederbörd vara den faktor som spelar störst roll för utsläpp av deponigas från markytan.
- Storskaliga resistivetsmätningar och mätningar med stångslingram visar god överensstämmelse. Stångslingram är en betydligt snabbare metod, men ger endast en plankarta som resultat till skillnad från resistivitet och IP där resultaten kan presenteras som en 3D-volym.
- Resistivitet och IP (och normaliserad IP) gav en god uppfattning om deponins inre struktur och sluttäckning.
- Resistivitet gav i kombination med refraktionsseismik en tolkning av grundvattenytans läge.





Innehåll

1. Introduktion	10
1.1 Kunskapsläget – Resultat från Fas 1.....	10
1.2 Syfte och målsättning – Fas 2	10
1.3 Genomförande – Fas 2	11
1.4 Kommunikation av resultat	13
2. Material & Metod	16
2.1 Metodbeskrivning: Resistivitet och IP	16
2.2 Steg 1 - Utvärdering av data från Fas 1	18
2.3 Steg 2 - Detaljerade mätningar för bättre processförståelse	18
2.4 Steg 3 - Utveckling av metodik i fullskala	31
2.5 Steg 4 – Fallstudier på referensdeponier	36
3. Resultat	38
3.1 Steg 1 – Visualisering av resistivitetsdata från Fas 1	38
3.2 Steg 2 - Detaljerade mätningar för bättre processförståelse	42
3.3 Steg 3 - Utveckling av metodik i fullskala	59
3.4 Steg 4 - Utveckling av metodik på referensdeponier	71
4. Diskussion	78
4.1 Allmänt om skillnader i data från mätningar på sommaren 2008 (Fas 1) och vintern 2009 (Fas 2).....	78
4.2 Nya indikationer på att man kan detektera gas med resistivitet – mer detaljerad mätning	81
4.3 Variationer i resistivitet; 3D-visualiseringar av detaljerade time lapse mätningar	84
4.4 Storskaliga mätningar för utveckling av metodik i fullskala	87
4.5 Erfarenheter från Steg 2 applicerat på de detaljerade mätningarna i Steg 3	90
5. Slutsatser	94
5.1 Detaljerade mätningar.....	94
5.2 Storskaliga mätningar	95
6. Referenser	96
7. Bilaga	98



1. Introduktion

I denna rapport beskrivs MaLaGa-projektet *Fas 2* som är en fortsättning på det under 2009 avslutade och rapporterade utvecklingsprojektet *Användning av geofysik för detektering av gas i deponier (Fas 1)*. Rapporten för *Fas 1* finns att ladda ner på Avfall Sveriges och Svenskt Gastekniskt Centers hemsidor. Akronymen MaLaGa är en förkortning för "Mapping of Landfill structures and Gas migration based on geophysical measurements".

Baserat på resultaten från *Fas 1* har huvudsyftet med MaLaGa-projektet *Fas 2* varit att vidareutveckla geoelektriska mätmetoder för bättre förståelse för förhållanden under markytan på deponier. De geoelektriska mätmetoder som använts har i huvudsak varit resistivitet och inducerad polarisation (IP), men även andra geofysiska metoder har utvärderats, nämligen seismik, stångsligram och magnetometri.

Författarna vill tacka Irene Bohn på NSR AB och Peter Flyhammar på Avfall Sverige för värdefulla kommentarer i samband med granskningen av denna rapport.

1.1 Kunskapsläget – Resultat från Fas 1

Huvudmomentet i *Fas 1* har varit att utveckla en geoelektrisk mätmetod (resistivitet) för att undersöka om metodiken går att utnyttja för att detektera gasrörelser i avfallsdeponier. Inom ramen för projektet har en slutrapport producerats, *Detektering av gas i deponier med resistivitet*. Rapporten blev färdigställd i april-09 och är publicerad i SGC:s och Avfall Sveriges publikationsserier (Rosqvist m.fl., 2009). Nedan beskrivs de huvudsakliga resultaten från projektet i *Fas 1*:

- Mätningarna visar att resistiviteten kan vara en mycket kraftfull metod för att undersöka processer och inre strukturer i deponier.
- Både vatten- och gasrörelser, vilka är viktiga vid drift av deponier, kan detekteras med hjälp av resistivitetsmetoden.
- Mycket snabba förändringar i resistivitet har uppmätts, och förändringarnas hastighet indikerar att de sannolikt till största del beror på ändringar i gastrycket i deponien. Därmed har det visat sig vara möjligt att detektera gasflöde i deponier, vilket har varit huvudsyftet med *Fas 1*.

1.2 Syfte och målsättning – Fas 2

Syftet med MaLaGa-projektet *Fas 2* har varit att vidareutveckla förståelsen för förhållanden under mark i deponier samt att utveckla en metodik som baseras på användning av flera geofysiska metoder samt mätning av materialparametrar som är viktiga för processförståelse för att bättre förstå förekomst och rörelser av gas och vatten i deponier på detaljnivå (t.ex. portryck, temperatur, fukthalt och joninnehåll), samt för att karakterisera innehåll och uppbyggnad av deponier. Projektet har därmed också syftat till att bättre kunna utnyttja energipotentialet i deponigasen och att minska läckage av klimatgaser till atmosfären, samt att minska föroreningsbelastningen till vattenresurser genom en bättre förståelse av vattens förekomst och rörelser i deponier.

Projektets syfte kan sammanställas i följande punkter:

- Vidareutveckla 3D-mätningar och 3D-analyser
- Vidareutveckla visualiseringsteknik för geofysiska resultat
- Bättre förståelse av gasrörelser i deponier och därmed bättre utnyttjande av energin i deponigasen



- Utveckla geofysiska metoder med fokus på kombination mellan resistivitet-IP och seismik.
- Lokalisering av deponiers utbredning
- Kartläggning av innehåll och inre struktur i deponier
- Kunna mäta grundvattenytans läge och avgränsade cellers ofta mycket varierande vatteninnehåll
- Kontroll av sluttäckning, utbredning, bottenbarriär och dess status

För att tillgodose att de ovan angivna syftena beaktades kunde följande målsättningar med projektet fastslås:

- Ta fram metodik för optimering av placering av brunnar/system för gasuttag
- Effektivare utnyttjande och drift av deponier (gasproduktion, gasuttag, detektering av läckage, kontroll av tätskikt)
- Förbättrade möjligheter att kontrollera risken för föroreningsspridning via lakvatten
- Framtagning av system och metodik för kontroll av tätskiktens funktion. Både avslutade deponiers övre tätskikt och nyanlagda deponiers bottenbarriär.
- Utveckling av metodik för avgränsning av äldre deponiers/soptippars utbredning, samt karakterisera dess innehåll och strukturella uppbyggnad

I en bilaga till denna rapport finns en sammanställning på tillämpningsområden som har utvecklats och testats inom MaLaGa-projektet Fas 2.

1.3 Genomförande – Fas 2

Genomförande av MaLaGa-projektet *Fas 2* har delats in i fyra steg, där *Steg 1* har inneburit analys av befintlig data som genererades i *Fas 1*, *Steg 2* och *Steg 3* har inneburit analys av nya fältmätningar som genomförs inom ramen för *Fas 2* i projektet. I *Steg 4* har en mätmetodik testats i fullskala på tre referensdeponier. Syftet med dessa mätningar har varit att utveckla och testa preliminärt framtagna metodik i mer uppdragslik form, samt för att sprida kunskap om tekniken. I tabell 1.1 sammanställs aktiviteter och fältlokaler översiktligt för de olika stegen i *Fas 2*.

Tabell 1.1: Översiktlig information om MaLaGa-projektets olika steg.

Steg	Aktiviteter
Steg 1	Analys av IP-data med utvecklad teknik, i samarbete med Århus Universitet, Danmark.
Steg 2	Mätningar i mindre skala för att utveckla processförståelse. Mätningarna utfördes på Filbornadeponin i Helsingborg.
Steg 3	Utveckling av metodik för geofysiska mätningar på deponier. Mätningar i fältskala och i mindre skala på Filbornadeponin, Helsingborg.
Steg 4	Tillämpning av metodik på tre externa deponier. ▪ SYSAB – Albäcksdeponin Trelleborg ▪ Stena Metall – Anläggningen i Halmstad ▪ VETAB – Flishultsdeponin i Vetlanda (Resultat redovisas ej i denna rapport)



Steg 1: Utvärdering av data från Fas 1

Steg 1 innebar en fördjupad analys av kombinationen resistivitet- och IP-analyser från fältmätningarna under *Fas 1*. Hittills utnyttjad mätdata från *Fas 1* i projektet har utvärderats med avseende på kombination av resistivitet och IP. Steg 1 har utgjort en viktig utveckling av kunskap och metoder för att utvärdera nya mätningar i Steg 2 och 3.

Steg 2: Detaljerade mätningar för bättre processförståelse

Syftet med Steg 2 var att genomföra en fördjupad studie av möjligheterna att detektera gas i deponier genom fältförsök i mindre fältskala, det vill säga, i samma skala som mätningarna i *Fas 1*. Genomförandet har haft ett tydligt fokus på kombination av geoelektriska metoder, och på hur annan information kan komplettera de geofysiska mätningarna. Exempel på annan information är temperatur, porttryck, fukthalt, och kemin i marken.

I Steg 2 genomfördes en fördjupad studie av processer som kan knytas till deponigas, tryck och rörelser, i deponin och vid markytan. Resultaten av mätningarna i *Fas 1* av projektet visar att viktiga parametrar är temperatur, porttryck, fukthalt och joninnehåll i marken. Dessa parametrar mättes och analyserades parallellt med de geoelektriska mätningarna. Fältstudierna i Steg 2 genomfördes i en försöksuppställning som liknade den som användes i *Fas 1* av projektet. Mätningarna i Steg 2 genomfördes cirka 18 månader efter de i *Fas 1* på exakt samma mätområde.

Steg 3: Utveckling av metodik i fullskala

Huvudsyftet med Steg 3 har varit att utveckla en stegvis metodik för geofysiska mätningar på deponier. Metodiken bygger på mätningar med olika geofysiska mätmetoder för olika tillämpningar och i olika skalor. Under Steg 3 har storskaliga (cirka 1 ha) geofysiska fältmätningar genomförts med i huvudsak fem olika syften (se tabell 1.2 nedan). Bland annat har kombination av resistivitet-IP och seismik utvärderats. Inom seismik har mätningar av refraktion- och ytvågsseismik (MASW) studerats. Även mätningar med stångslingram och magnetometri har utförts. När de storskaliga mätningarna har analyserats valdes ett mindre delområde ut för en mer detaljerad mätning av resistivitet och IP. Dessa mätningar syftade till bättre förståelse av förekomst av vatten och deponigas, samt till en kartläggning av inre strukturer och täcksiktets utseende.

Tabell 1.2. Syften med fördjupningar inom Steg 3.

Syfte	Fördjupning
1 Lokalisering av deponiers utbredning	Kombination av resistivitet-IP och seismik (refraktions- och ytvågsseismik (MASW)) för en säkrare tolkning med hjälp av flera materialparametrar. Tillgänglig information i form av deponeringshistorik har använts för att komplettera de geofysiska mätningarna.
2 Innehåll och inre struktur i deponier	Kombination av resistivitet-IP, magnetometri och seismik (refraktions- och ytvågsseismik (MASW)) för att undersöka inre strukturer i deponier. Tillgänglig information i form av deponeringshistorik har använts för att komplettera de geofysiska mätningarna
3 Zoner som indikerar gas [bla variabilitet och hög resistivitet]	Resistivitet-IP undersökningar för att storskalig detektering av gasförekomst i deponier. I detta moment utnyttjades information från resultaten i Steg 2.



- | | | |
|---|-------------------------------------|---|
| 4 | Grundvattenytans läge | Kombination av resistivitet-IP och seismik (refraktions- och ytvågsseismik (MASW)) för att undersöka om det är möjligt att utveckla en metod för detektering av grundvatten i deponier. |
| 5 | Sluttäckning, utbredning och status | Mätningar med refraktionsseismik (landstreamer) och stångslingram som komplement till resistivitet-IP för att undersöka sluttäckningar på deponier. |

Steg 4: Utveckling av metodik på referensdeponier

Inom steg 4 har ett fåtal deponiägare erbjudits ett deltagande i projektet där deras deponi har använts som en referensdeponi. Slutligen har tre deponier valts ut för ett begränsat mätprogram i fullskala. Syftet med dessa mätningar är att testa den preliminärt framtagna metodiken i Steg 3 i en mer uppdragslik form, samt för att sprida kunskap om tekniken. De utvalde deponierna och tillämpningsområdena på respektive deponi har varit;

- | | | | |
|---|--------------|-----------------------------|--|
| ▪ | SYSAV | Albäcksdeponin Trelleborg | Mätningar för detektering av gas vid gasbrunn. |
| ▪ | Stena Metall | Anläggningen i Halmstad | Pilotmätningar för Landfill mining |
| ▪ | VETAB | Flishultsdeponin i Vetlanda | Detektering av grundvattenytor i deponin samt förorenings-spridning i grundvatten (resultat redovisas ej i denna rapport). |

1.4 Kommunikation av resultat

Artiklar, rapporter och konferens bidrag

Kommunikation av resultat har prioriterats högt under Fas 2 på samma sätt som under Fas 1. Det innebär att ett flertal artiklar rapporter och konferensbidrag har publicerats under projektets genomförande. I tabell 1.3 sammanställs de publikationer som har tagits fram inom Malaga-projektet. Se även referenslistan. En av de vetenskapliga artiklarna, *Mapping landfills gas migration using resistivity monitoring*, som publicerats i tidsskriften *Waste and Resource Management* har under 2012 uppmärksamats med ett pris; *The Telford Award*. Priset delas ut till de bästa artiklarna som har publicerats hos ICE (Institution of Civil Engineers, UK) under 2011.

Tabell 1.3 sammanställning av de publikationer som har skapats inom MaLaGa-projektet.

Vetenskapliga artiklar

Johansson, S., Rosqvist, H., Svensson, M., Dahlin, T., Leroux, V. 2011: An alternative methodology for the analysis of electrical resistivity data from a soil gas study. In: *Geophysical Journal International*, Volume 186, Issue 2, pages 632–640, August 2011

Loke M.H., Dahlin T and Rucker D. submitted, Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3-D resistivity surveys, *Near Surface Geophysics*

Powrie, W., and Rosqvist, H. 2011 Editorial. *Waste and Resource Management* 164: 1-2.

Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2011. Mapping landfills gas migration using resistivity monitoring. *Waste and Resource Management* 164:3-15.

Populära artiklar

De svenska pionjärerna inom deponigas. *Avfall och miljö* #1, 2009. pp 16-17.



Rapporter

Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Månsson, C-H., Lindsjö, M., 2009. Detektering av gas i deponier med resistivitet. Avfall Sverige U2009:19.

Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Månsson, C-H., Lindsjö, M., 2009. Detektering av gas i deponier med resistivitet. SGC 208.

Konferensbidrag och abstract

Dahlin, T., Rosqvist, H., Leroux, V., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2008. Potential of Geoelectrical Imaging Techniques for Detecting Subsurface Gas Migration in Landfills - An Experiment. Near Surface 2008 - 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Kraków, Poland, 15-17 September 2008.

Dahlin, T., Leroux, V., Rosqvist, H., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2008. Geoelectrical Resistivity Monitoring for Localizing Gas at Landfills. Near Surface 2009 - 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Dublin, Ireland, 7 - 9 September 2009.

Dahlin, T. (2011) Resistivity-IP Surveying for Engineering and Environmental Applications Using Multi-Electrode Equipment, *Procs. Fifth All-Russia School-Workshop on Electromagnetic Sensing of the Earth - EMS-2011*, St. Petersburg, 16-21 May 2011, Book 2, 252-255.

Dahlin T., Rosqvist H., Johansson S., Månsson C.-H., Svensson M., Lindsjö M., Loke M.H. (2011) Geoelectrical Monitoring for Mapping of Gas and Water Migration in Landfills, in *Abstracts 1st International Workshop on Geoelectrical Monitoring, GELMON 2010, Vienna, 30.11.-2.12.2011*, 1 p.

Dahlin, T. (2012) Application of Resistivity-IP to Mapping of Groundwater Contamination and Buried Waste, in *Procs. Seminar on Environmental Geophysics, Dublin, 15th February 2012*, Geophysical Association of Ireland, p 1-6.

Dahlin, T. Rosqvist H., Johansson S., Svensson M., (2012) Resistivity-IP characterisation and short term monitoring at Filborna waste deposit, *Procs. 74th EAGE Conference, Copenhagen, 4-7 June 2012*, EAGE, 4 p.

Rosqvist, H., Dahlin, T., Leroux, V., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2008. Potential of geo-electrical imaging techniques for detecting subsurface gas migration in landfills. ICLRS-08 - Intercontinental Landfill Research Symposium. Colorado, USA, September 2008.

Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2009. An evaluation of the potential of the geoelectrical resistivity method for mapping gas migration in landfills. HPM3 workshop, 10-12 March 2009, Braunschweig, Germany

Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H. and Johansson, S. 2009. An evaluation of the geoelectrical resistivity method for mapping gas migration in landfills. Proceedings Sardinia -09, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.

Rosqvist, H. and Dahlin, T. (2010) Geoelectrical imaging for detection of water migration in a bioreactor landfill. Application of Geophysics to engineering and environmental problems. Symposium. 23rd 2010. (SAGEEP 2010) (2 Vols).

Rosqvist, H., Johansson, S., Streblow, C., and Gebert, J. (2011) Spatial and temporal variability of gas migration at the surface of a MSW landfill. Proceedings Sardinia-11, Thirteen International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.

Rosqvist, H., Johansson, S., Dahlin, T., Leroux, V., and Svensson, M. (2011) Development of 3D geoelectrical resistivity for mapping of gas migration in landfills. Proceedings Sardinia-11, Thirteen International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.

Workshops

Inom ramen för MaLaGa-projektet *Fas 2* anordnades en andra internationell workshop i Malmö, den 16-17 februari 2012 - *Second workshop on geophysical measurements in waste management*. Den första workshopen anordnades inom MaLaGa-projektet *Fas 1*, i november 2008. Vid den andra workshopen närvarade cirka 20 personer från sex länder; Sverige, Norge, Danmark, Belgien, Storbritan-



nien och Frankrike. I tabell 1.4 sammanställs de presentationer som visades vid den andra workshopen, den 16-17 februari i Malmö.

Tabell 1.4. Presentationer vid workshopen *Second workshop on geophysical measurements in waste management, Malmö, 16-17 februari 2012*

Thursday, February 16

Evolution of electrical resistivity measurements during process of waste biodegradation at lab. - Sylvain Moreau, Le Cemagref devient Irstea, France

Laboratory scale delineation of 'preferential flow' in landfill. - Nick Woodman & Geoff Watson, University of Southampton, UK.

Geo-electrical forward modelling using comsol multiphysics at lab-scale. - Sylvain Moreau, Le Cemagref devient Irstea, France

Geophysical investigation and well logging at msw landfill. - Martijn van Praagh, Sweco, Sweden

Non intrusive geophysics for pollution plume mapping inside an operating plant. - Patrich Holmström, Norges Geotekniske Institutt, Norway

Pilot study of using IP and Resistivity for separation of industrial waste. - Torleif Dahlin, Engineering Geology, Lund University, Sweden (*MaLaGa-projektet*)

Friday, February 17

For a better and more widespread use of geophysics in landfill applications. - Virginie Leroux, Cowi, Denmark

Detailed time lapse resistivity measurements for gas detection in landfills. - Sara Johansson, Tyréns AB, Sweden (*MaLaGa-projektet*)

Geoelectrical characterization of the internal structure and diodegradation of an old Municipal Solid Waste. - Véronique Naudet, BRGM, France

Mapping landfills with Time Domain IP: The Eskelund case study. - Aurélie Gazoty, HydroGeophysics Group, Aarhus University, Denmark

We make the landfill transparent. - Håkan Rosqvist, Rosqvist Resurs, Sweden. (*MaLaGa-projektet*)

Hemsida

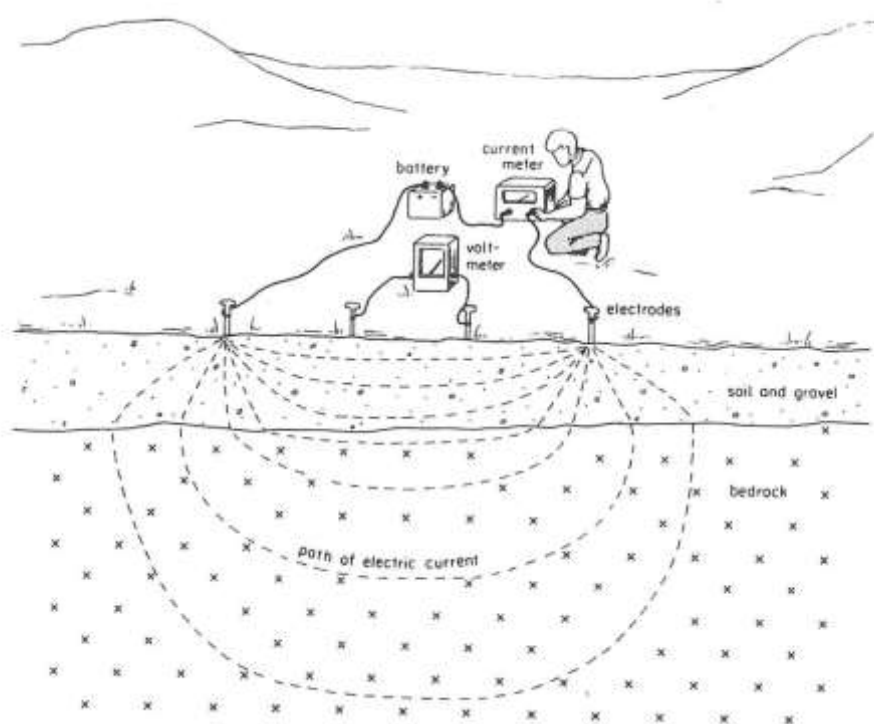
För att åstadkomma en effektivare kommunikation har MaLaGa-projektet publicerat en hemsida (www.malagageophysics.blogspot.com). På projektets hemsida publiceras nyheter kontinuerligt och samtliga publikationer, rapporter och workshop bidrag som tagits fram inom projektet kan laddas ner.



2. Material & Metod

2.1 Metodbeskrivning: Resistivitet och IP

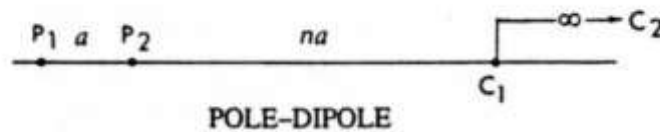
Resistivitet är en materialegenskap som beskriver de isolerande egenskaperna hos olika material. Till skillnad från resistans är resistivitet oberoende av materialets geometri. Markens resistivitet mäts med hjälp av korta pulser av likström som skickas via par av elektroder i galvanisk kontakt med marken, samtidigt som spänningsfallet mäts över ett annat elektrodpar (Figur 2.1). Genom att systematiskt variera elektrodavståndet kan information om djupfördelningen av resistiviteten erhållas, och genom att också flytta elektroduppställningen längs en linje eller över en yta kan information om variationer i markens resistivitet i tre dimensioner erhållas.



Figur 2.1. Princip för resistivitetsmätning: en kontrollerad ström sänds mellan två elektroder samtidigt som spänningen mäts mellan två andra elektroder (efter Robinson och Coruh 1988).

Mätningarna utfördes här med pol-dipolkonfiguration, vilket innebär att man använder en fjärrelektrod för strömsändningen i kombination med en av elektroderna i elektrodutlägget (figur 2.1). Pol-dipol valdes för att konfigurationen relativt andra elektrodkonfigurationer ger bra upplösning, täckning i kanterna och djupnedträngning.





Figur 2.2. Elektrodkonfigurationen pol-dipol. P1 och P2 är spänningselektroder, medan C1 och C2 är strömelektroder (Sharma 1997).

Den uppmätta resistiviteten benämns skenbar resistivitet, då resultaten förutsätter att marken är homogen. De uppmätta och uppritade resultaten (den s.k. pseudosektionen) tolkas med hjälp av inversion (invers numerisk modelltolkning). Tolkningen bygger på att en tredimensionell modell av marken jämförs med den uppmätta pseudosektionen. Resultatet av modelltolkningen visas i form av sektioner av resistivitetsvariation mot djupet, i horisontella snitt på olika djup samt volymsmodeller. Vid tolkningen av resultaten är det viktigt att beakta att den typ av modell som användes inte ger några exakta djup till eller mäktigheter på olika lager i marken. Vidare avtar upplösningen med djupet, vilket gör att mindre avvikelser eller förändringar på större djup inte kan upptäckas.

Resistivitet är som tidigare nämnts en materialparameter, men den är även beroende av temperatur och vattenhalt i materialet. Archie's ekvation utgör en grundläggande teoretisk bakgrund till hur resistivitet förhåller sig till porvatten och porositet i omättad mark:

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \quad (1)$$

där ρ är resistiviteten, ρ_w är resistiviteten i markens porvatten, ϕ är porositeten, S är vattenmättnadsgraden (alltså volymen av vattenfyllda porer genom den totala porvolymen) och a , m och n är empiriska konstanter (Keary & Brooks 1991). Marktemperaturen påverkar resistiviteten eftersom ledningsförmågan ökar med ökande temperaturer, främst p.g.a. att mobiliteten hos joner i marken ökar. Temperatureffekten beskrivs av:

$$\rho_t = \frac{\rho_r}{1 + \alpha(t - t_r)} \quad (2)$$

där ρ_r är resistivitet uppmätt vid referenstemperaturen t_r , and α är temperaturkoefficienten som har ett värde på 0,025 per grad (Keller et al. 1966).

IP-parametern är ett mått på hur lång tid det tar för en externt applicerad spänning att klinga av från marken och kan mätas samtidigt som resistivitet. Med andra ord beskriver IP materialets förmåga att fungera som en kondensator. Storleken på IP-effekten beror bl.a. på själva materialet men också konduktiviteten hos vätskor i materialet. Förutom att presentera resultaten som resistivitet och IP, används här också parametern normaliserad IP vilken är IP dividerat med resistivitet. Skillnaden mellan IP och normaliserad IP är att den senare i många fall är bättre på att kvantifiera polariseringen och ger ett bättre samband mellan strukturella egen-



skaper i marken och IP-effekt. Normaliserad IP är oberoende av materialets resistivitet (Slater, L. et al. 2002).

2.2 Steg 1 - Utvärdering av data från Fas 1

En inledande analys av IP-data från Fas 1 påbörjades, men det visade sig dock snabbt att kvaliteten på IP-datan var otillräcklig varför arbetet avbröts. Dock utvärderades resistivitetsdata från Fas 1 vidare i denna del genom 3D-visualisering och 3D-analyser, eftersom en metodutveckling inom detta område uppnåddes i Fas 2 – Steg 2 (se nedan). Dessa resultat diskuteras vidare i kapitel 3.1.

2.3 Steg 2 - Detaljerade mätningar för bättre processförståelse

Fältstudierna i Steg 2 genomfördes i försöksuppställningar som liknar de som har genomförts i Fas 1 av projektet. De största skillnaderna var att mätningarna utfördes under sommaren i Fas 1 och på vintern i Fas 2 – Steg 2, och att man vid planeringen av mätningarna i Fas 2 – Steg 2 drog nytta av tidigare erfarenheter för att förbättra fältmetodiken och datakvaliteten på flera av de uppmätta parametrarna. Fältundersökningen i Steg 2 pågick i sin helhet mellan 11 november och 22 december 2009.

Geoelektriska mätningar (resistivitet och IP) var liksom tidigare den grundläggande mätmetoden. Metoder som ansågs kunna verifiera gasförekomst var mätningar av CH₄ (metan)- och CO₂ (koldioxid)-flöden från markytan genom statisk kammare-metoden eller laserscanning, samt mätningar av gaskoncentration (CH₄, CO₂, O₂ (syre), och N₂ (kväve)) och portryck i marken. Även time lapse mätningar med IR-kamera utfördes för att testa om gasutsläpp vid markytan skulle kunna ge sig tillkänna genom en förhöjd temperatur och därmed vara till stöd vid tolkningen av resistivitetsdata. Förutom detta registrerades även väderförhållanden, marktemperatur och markfuktighet noggrant eftersom inverkan av dessa faktorer påverkar både resistivetsmätningar och markprocesser kraftigt. Dessutom gjordes jordprovtagning och CPT-sounding för att ge information om tjockleken och materialet i deponins täcklager. Syftet med detta var att kunna korrelera både resistivetsmätningar och gasflödesmätningar med täcklagrets varierande egenskaper.

Dataanalysmetoderna innefattade statistiska metoder men till störst del kvalitativa och visuella analyser. Resistivetsdatan analyserades främst genom 3D-modeller som, förutom resistivetsdistributionen och variationskoefficienten, även visualiserade den procentuella förändringen i resistivitet vid olika mättillfällen.

Mätområde och mätuppställning

Mätningarna utfördes på samma område på Filbornadeponin som i Fas 1. Ambitionen var att hitta exakt samma positioner som tidigare på den 20x16m stora försöksytan. Sedan fältmätningarna i Fas 1 under sommaren 2008 hade dock deponin täckts av ett flera meter tjockt sluttäckningslager. Sluttäckningen avlägsnades från försöksytan i möjligaste mån, men markytan från mätningarna under sommaren 2008 respektive vintern 2009 skiljer sig åt något. Detta beror dels på svårigheter att avlägsna sluttäckningen jämnt och dels på de sättningar som har skett i deponin under perioden från sommaren 2008 till vintern 2009. Ett foto på undersökningsytan taget från söder mot norr visas i figur 2.3.

I figur 2.4 visas en principsektion av Filbornadeponin vid mätområdet. Under sluttäckningen är deponin uppbyggd av horisontella lager av kommunalt och in-

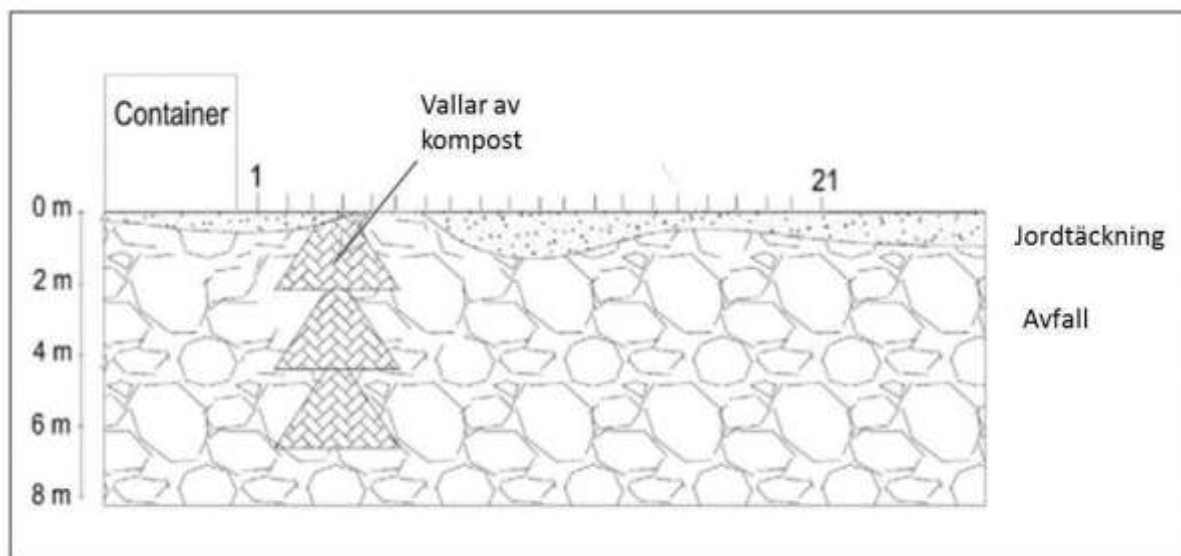


dustriellt avfall. Den sista deponeringen i området utfördes 2007. Varje avfallslager är runt 2 meter djupt och består främst av plast- och trämaterial blandat med jord. Överst finns material från en gammal deponi som flyttades till Filbornadeponin cirka ett år före mätningarna. Avfallsmaterialet som flyttades härrör från 1930-1950-talet och är i huvudsak inert, och utgör ett lager av varierande tjocklek mellan 0 till 0.5 meter. Deponin är indelad i celler av ett antal kompostvallar varav en löper under försöksytan ca tre meter in från den sydvästliga kanten av undersökningsområdet på mindre än en meters djup. Materialet i kompostbarriären består av en relativt porös blandning av jord och träflis och ökar i tjocklek med djupet under markytan. Längs med kompostvallen löper en gasledning, och precis vid nordvästra kanten till undersökningsområdet finns en vertikal gasbrunn som omges av ett poröst sandlager.



Figur 2.3. Foto över mätområdet från ovan, taget från syd mot norr.





Figur 2.4. Principsektion av Filbornadeponin vid mätområdet.

I tabell 2.1 sammanfattas de olika mätmetoder som användes under Fas 2 – Steg 2 samt de dataset som erhöles från mätningarna. En mer detaljerad beskrivning av respektive metod ges nedan i detta kapitel.

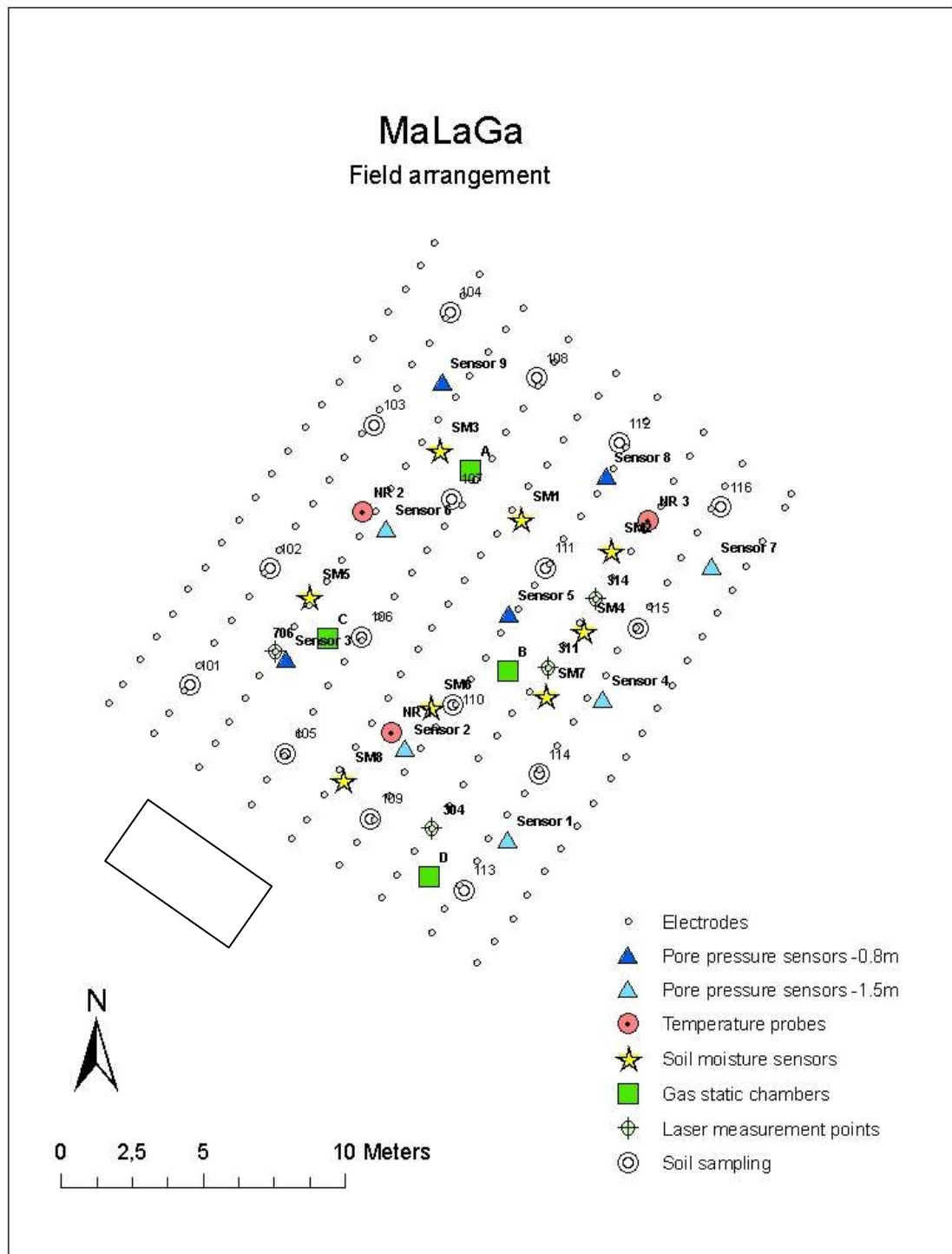
Tabell 2.1 och figur 2.5 ger tillsammans en översikt över positioner av mätinstrument på undersökningsytan och sensorer/mätdataans djup under markytan, samt med vilken metod olika dataset mättes. I tabell 2.2. visas tillgängligheten av olika dataset över tid.



Tabell 2.1. Översikt av dataset och antal mätpunkter för vardera mätmetod under Fas 2 – Steg 2.

Mätstorhet	Mätmetod	Sensors/mätdata djup under markytan	Datasets
Resistivitet och IP	Geoelektriska mätningar	0-2m	Resistivitet, IP
Markfuktighet	Markfuktighetssensorer från Delta-T Devices,	0m	Markfuktighet
Portryck	BAT-spetsar	0.8/1.5m	Totaltryck, Portryck, Marktemperatur
Marktemperatur	Prober med 4 sensorer	0.05/0.2/0.5/1.0m	Marktemperatur (profil)
Temperatur	IR-kamera	0m	Markytans temperatur
Väderdata	Väderstation med datalogger	Marktemperatur på 0.05m	Vindhastighet, vindriktning, lufttryck, lufttemperatur, marktemperatur, nederbörd
Metanhalt vid markytan	Laserscreening	Strax över markytan	Gaskoncentration
Gasflöden vid markytan	Statisk kammare	0m	CH ₄ -och CO ₂ -flöde
Gaskoncentrationer vid ytan och på 20 cm djup	Atmosfärs- och porluftsprövtagning/gasanalysator i fält		Porgaskoncentration (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , N ₂), luftkoncentration (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , N ₂)
Jordens/avfallets egenskaper	Skruvprovtagning med borrhandsvagn	0.0-2.0m (t.o.m. avfalls-lager)	Jordprovtagning, CPT-sounding i 4 punkter





Figur 2.5. De olika mätinstrumentens positioner vid mätningarna i Fas 2 – Steg 2, Filbornadeponin november-december 2009. Även husvagnens läge utanför mätområdet är markerat.



Tabell 2.2. Översikt av tillgänglig data från olika mätmetoder under mätperioden, samt observationer av speciella påverkande händelser såsom avstängningen av gasbrunnarna på deponin och förekomst av snö.

Metod	Vecka 45	Vecka 46	Vecka 47	Vecka 48	Vecka 49	Vecka 50	Vecka 51	Vecka 52
Resistivitet								
IP			?	?	?	?	?	?
IR-kamera								
Metalkoncentration laser								
Väderdata								
Gaskoncentration mark								
Gasflöden rumsligt								
Gasflöden långtidsmätning								
Markfuktighet								
Marktemperatur (prober)								
Portryck								
Jordprovtagning								
Påverkande faktorer								
Frusen mark								
Snöfall/snötäcke								
Gasuttag av								



Data finns under hela perioden

Data finns under delar av perioden

Geoelektriska metoder (Resistivitet och IP)

Geoelektriska mätningar för Steg 2 utfördes under perioden den 11 november till den 22 december 2009. Mätupställningen bestod av 9 parallella resistivitetslinjer med två meters mellanrum. Elektroavståndet var en meter, och totalt 21 elektroder installerades på varje linje. Elektrodkonfigurationen var pol-dipol med en fjärr-elektrod placerad ca 100m från undersökningsområdet. Pol-dipol valdes för att konfigurationen relativt andra elektrodkonfigurationer ger bra upplösning, täckning i kanterna och djupnedträngning. Mätsystemet var ABEM-Lund Imaging system, som kontrollerades fjärrstyrt via ett modem. Varannan timme utfördes en komplett resistivitetsmätning av undersökningsvolymen.

Ambitionen var att mäta under hela perioden mellan den 11 november och 22 december, men vid några tillfällen uppstod problem med mätningarna. Efter en storm i början av mätperioden upptäcktes det att några elektroder kopplats ur, och därför saknas resistivitetsdata mellan den 11 och 18 november. Efter detta gick en ström-booster (SAS 2000) sönder vilket inte upptäcktes direkt, vilket ledde till att data även saknas mellan perioden 28 november till 4 december. Förutom detta

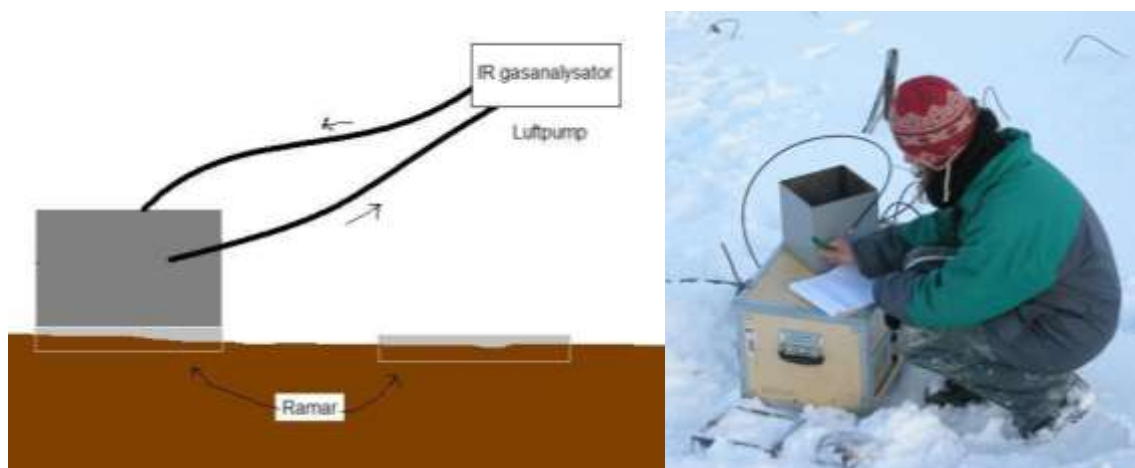


skapade minusgrader i marken under vissa perioder problem i form av oacceptabel datakvalitet. Datakvalitet under mätperioden redovisas vidare under kapitel 3.

Processeringen av data utfördes med datorprogrammet Res3DInv (Loke and Barker 1996, www.geoelectrical.com) som skapar 3D-modeller av markens elektriska ledningsförmåga där finita elementmetoden (FEM) i kombination med s.k. inversmodellering används. Endast negativa resistivitetsvärden togs bort ur datasetet, även om en del orealistiskt höga värden även upptäcktes vid senare tillfälle. Samma parametrar användes för inversionerna av alla dataset. För visualisering och presentation användes Voxler från Golden Software.

Gasflödesmätningar (långtidsmätningar)

Gasflöden av metan (CH_4) och koldioxid (CO_2) vid markytan mättes med statisk kammare-metoden i fyra olika mätpunkter (A-D i figur 2.6). Användningen av statiska kammare är en etablerad metod som använts under flera decennier för att mäta flödet av olika gaser från marken (Davidson et al. 2002) och beskrivs nedan. Ambitionen var att mäta på förutbestämda positioner baserade på inledande resultat av resistivitetsmätningarna. Då en del av mätpositionerna var olämpliga för gasflödesmätningar (t.ex. vattentäckta ytor) valdes lämpliga mätpunkter slumpvis ut i fält, dock inom ett begränsat område från de ursprungligt bestämda positionerna. En principskiss över mätutrustningen visas i figur 2.6 (vänster) tillsammans med ett foto från fältmätningarna (höger).



Figur 2.6. Uppställning för mätningar med statisk kammare, principskiss och fotografi från fältmätningarna.

Mätutrustningen bestod av en tio-liters rektangulär stålchamare kopplad via plast-rör till provgasingången respektive -utgången i en NDIR gasanalysator (Siemens, Ultramat 23). Plastramar matchande stålchamaren installerades ett par centimeter ner i markytan på mätpunkterna, för att störningar vid nedsättandet av kam-maren på marken inför mätningarna skulle kunna undvikas. Ramarna hade tunna rännor som fylldes med vatten för att förhindra luftläckage mellan ramarna och kam-maren.

En intern pump i gasanalysatorn cirkulerade kontinuerligt luft från kam-maren via provgasingången till analysatorns provcell, där koncentrationer av CH_4 och CO_2 mättes med infraröd teknologi. Från provcellen leddes luften vidare till analysa-torns utgång och tillbaka till kam-maren. Luften i kam-maren var därför del av ett slutet system, där det enda externa tillflödet av gas under mätningen kom från



marken under kammaren. På så sätt ökade koncentrationerna av CH₄ och CO₂ kontinuerligt i kammaren, och utifrån ökningen i koncentration (slope, ppm/min) kunde gasflöden (mg m⁻² h⁻¹) av CH₄ och CO₂ beräknas enligt ekvationen:

$$F = slope \cdot \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \cdot \frac{M}{A} \cdot 60 \quad (3)$$

där A (m²) och V (m³) är basarean respektive volymen hos kammaren, M (g mol⁻¹) är molarmassan för CH₄ respektive CO₂, p (hPa) är gastrycket, T (K) är lufttemperaturen och R (J mol⁻¹ K⁻¹) är gaskonstanten. För beräkningarna användes lufttrycket och lufttemperaturen som registrerats i väderstationen. r^2 -värdet för de linjära regressionerna var i snitt 0.97 vilket visar att mätvärdena var av god kvalitet.

Koncentrationerna av CH₄ och CO₂ lästes av manuellt direkt efter att kammaren placerats på ramen, och därefter i en-minutsintervall i totalt fem minuter. Gasflöden mättes på varje mätpunkt mellan sex och åtta gånger per dag mellan den 30 november till den 17 december (med undantag för den 12 och 13 december). Totalt mättes cirka 100 värden av CH₄ och CO₂-flöde på varje mätpunkt.

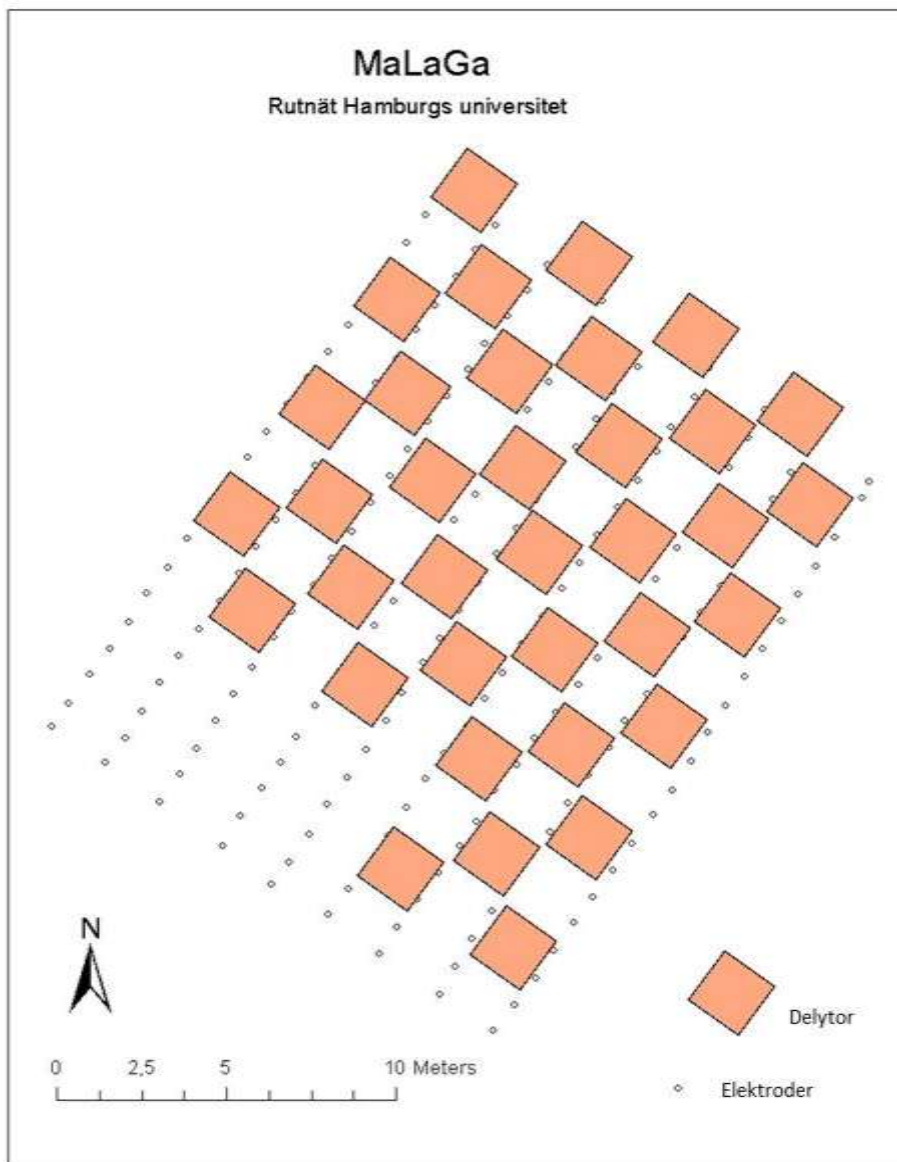
Rumsliga variationer i gasflöden- och gaskoncentration (Hamburgs Universitet)

Genom ett samarbete med Institutionen för markvetenskap på Hamburgs Universitet utfördes gasmätningar också utifrån andra frågeställningar. Eftersom de temporära förändringarna i gasflöde mättes i fyra mätpunkter enligt ovan, fokuserade kollegorna från Hamburgs Universitet på att under två fältdagar (2 till 3 december 2009) söka efter rumsliga variationer inom undersökningsområdet.

Undersökningsområdet delades in i ett regelbundet rutnät om 10x8 delytor, vardera 2x1m stora. Centrerat i varannan ruta genomfördes mätningar av gasflöden samt gaskoncentration vid markytan och på 20cm djup under markytan. Fem av de totalt 40 utvalda mätpunkterna i rutnätet användes ej då marken var täckt av en vattenyta. Figur 2.5 visar Hamburg universitets mätpunkter i förhållande till elektroderna för resistivitetsmätningarna. På kartan framgår även att området i sydväst var vattentäckt genom att mätpunkter saknas.

CH₄-koncentrationer vid markytan mättes på de 35 delytorna den 2 december, och mätningar av markens gassammansättning utfördes den 3 december. Under båda dagarna utfördes även gasflödesmätningar vid markytan.





Figur 2.7. Rutnät som användes vid mätningarna utförda av Institutionen för markvetenskap på Hamburgs Universitet, i förhållande till elektroderna för resistivitetmätningarna.

Mätningar av CH_4 -koncentrationer vid markytan utfördes med en mobil flame ionization detector (FID) kopplad till ett aluminiumrör med en tratt. Tratten placerades på marken, och koncentrationen registrerades efter 15 sekunder (den tid det tar för att pumpa luft genom tratten och röret). Bakgrundskoncentrationen av CH_4 mättes i luften 1m över markytan. Tre mätningar per ruta i rutnätet utfördes varefter medelvärdet beräknades.

Sammansättningen av markgas på 20cm djup under markytan mättes med en mobil markgas-prob som bestod av ett aluminiumrör som slogs ned i marken. Röret förseglades med ett gummiseptum, och prover togs genom detta med nål och spruta. Volymen av röret pumpades innan ett 60ml-prov togs och analyserades direkt med en biogas-analysator som gav koncentrationerna av CH_4 , CO_2 och O_2



(BM 2000, Geotechnical Instruments (UK) Ltd). Bilder på mätutrustningen visas i figur 2.8.



Figur 2.8. Mobil markgas-prob och biogas-analysator

CH₄ - och CO₂-flöden mättes med öppna statiska kammare, se figur 2.9. Kammaren var utrustad med tre provutgångar, vilka var kopplade till en mobil flame ionization detector (TVA 1000B Toxic Vapor Analyzer, Thermo Fisher Scientific Inc.) som hade programmerats till att registrera CH₄-koncentrationen i kammaren en gång per minut. Kammaren var också utrustad med två öppna rör (5mm i diameter), som kontinuerligt kopplade samman kammaren med atmosfären och därmed kompenserade för eventuella tryckskillnader, utan att allt för mycket CH₄ kunde läcka från kammaren. CH₄-flödena beräknades från den linjära ökningen i CH₄-koncentration i kammaren över tid, enligt:

$$E = \frac{(m \times A_{ch} \times 60)}{(V_{ch} \times 1000)} \quad (4)$$

där E är flödet (l m⁻² h⁻¹), m är lutningen av den linjära regressionen C_{CH₄} t⁻¹ (ppm min⁻¹), A_{ch} är ytan täckt av kammaren (m²) och V_{ch} är volymen av kammaren (l).



Figur 2.9. Öppen statisk kammare.



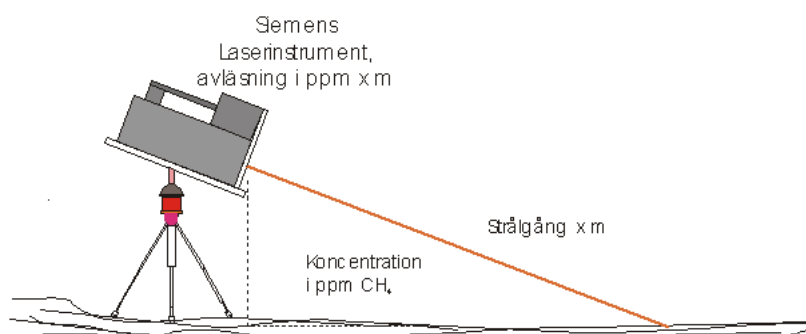
CO₂-koncentrationer i kammaren registrerades automatiskt med en diffusionsbaserad infraröd CO₂ analysator (modell IAQ-CalcTM-7545, TSI) som placerades under kammaren. CO₂-flöden beräknades från data på samma sätt som i ekvation (4). En kammarmätning utfördes under sex minuter. Detektionsgränsen för CH₄ var 0,0005 dm³ h⁻¹.

Metankoncentrationsmätningar (ytscanning av "hot-spots")

I projektet har ett handburet Siemens AG, CT PS 8 lasersystem använts för mätning av metankoncentrationer vid markytan. Instrumentet är utvecklat för fältmässig fjärrdetektering av gasemission från naturgas inom ramen för VOGUE (Visualisation of Gas for Utilities and the Environment).

Siemens lasersystem arbetar med en infraröd laser, 1651nm, och är ett s.k. backscatter system där laserstrålen sänds ut och registrerar koncentrationen av metangas utmed en strålgång när laserstrålen återreflekterats från en bakgrundsytta. Gaskoncentrationen mäts i enheten ppm x m vilket innebär att lasern ger ett medelvärde av koncentrationen utmed den aktuella mätsträckan från lasern till backscatterytan och tillbaka.

Mätmetoden kan vara antingen pinpointing eller fast uppställd långtidsmätning. Pinpointing innebär att man aktivt söker läckagekällan först genom horisontell skanning för att indikera förekomst av gasemissioner och därefter genom vertikal avsökning och detektering tills man hittar läckagekällan/källorna. Långtidsmätning utförs genom att instrumentet monteras på ett stativ och riktas mot samma utsläppspunkt under ett tidsintervall för att åskådliggöra tidsskillnader i utsläppet (figur 2.10).



Figur 2.10. Långtidsmätning med laserinstrumentet.

I det aktuella projektet användes pinpointingmetoden. Laserscanningarna utfördes under den 17 och 19 november samt den 14, 15, 17 och 18 november. Positioner där detekterbart läckage upptäcktes är synliga i figur 2.5 ovan (laser measurement points).

IR-kamera

För att studera förändringar i värmeemissioner från markytan i undersökningsområdet användes en infraröd kamera från FLIR systems (P6600). Hypotesen var att varm deponigas värmer upp markytan då den emitteras till atmosfären, och att varma områden samt områden med fluktuerande temperatur skulle kunna indikera gasemissioner. IR-kamerans känslighet är 45mK och upplösningen på bilderna 640x480 pixlar.



IR-kameran installerades på en sky lift ca 20 meter över markytan (vilket dock inte var tillräckligt högt för att täcka hela undersökningsytan; kanterna av undersökningsområdet är därför ej undersökta med IR-kamera), se figur 2.11. Kameran ställdes in på att ta en bild per minut, men p.g.a. de tuffa väderförhållandena ovanför deponin stannade bildtagningssekvensen av vid flera tillfällen, vilket upptäcktes i samband med det dagliga nedsänkandet av sky liften och kontrollen av utrustningen. Det finns därför glapp i mätserien från IR-kameran som pågick från den 26 november till den 6 december.

En värmekabel placerades på markytan i syfte att markera ut en referenstemperatur på bilderna från IR-kameran. Den 1m långa värmekabeln placerades runt marktemperatursensorn som loggades i väderstationen. Värmekabeln syntes tydligt på bilderna då den var något varmare än omgivningarna, och därmed gav den också en position för var temperatursensorn var placerad.



Figur 2.11. Bild på undersökningsområdet tagen från sky lift

Väderstation

Parallellt med resistivitetsmätningarna utfördes kontinuerliga mätningar av väderdata genom registrering av några valda parametrar;

- Lufttryck (Setra 278)
- Nederbörd (ARG10, tipping bucket)
- Temperatur luft (specialgjord sond, mäter 1 m över mark)
- Temperatur mark (specialgjord sond, mäter 5 cm ner i marken)
- Vindhastighet och vindriktning (Wind Sonic, mäter 1 m över mark)

Mätningar av väderparametrar utfördes en gång per minut och lagrades i en Campbell C1000 data logger (Campbell Manufacturing).



Markfukt

Sex markfuktssensorer (Delta-T Devices, SM2000) kopplade till en markfuktslogger (Delta-T Devices, DL6) och installerades på 5cm djup i undersökningsområdet. Loggern registrerade markfuktsdata varje halvtimme mellan den 16 november till den 21 december. Sensorerna placerades ut slumpmässigt men jämnt fördelat över undersökningsytan, och deras lägen kan ses i figur 2.5 ovan.

Marktemperatur

Tre temperaturprober (UMS, Th3 Soil temperature profile probes) med sensorer på 5cm, 20cm, 50cm och 100cm djup under markytan installerades i undersökningsområdet. Proberna kopplades till en datalogger (EMS Brno, MiniCube) som registrerade värden en gång i halvtimmen under perioderna 16 till 20 november och 5 till 16 december. Lägena för de tre temperaturproberna visas i figur 2.5 ovan.

Portryck

Portrycket i marken mättes på 0.8m djup under markytan i fyra punkter, och på 1.5m djup i fem punkter jämt spridda över undersökningsytan (se figur 2.5). Hypotesen var att områden med mycket deponigas skulle kunna påvisas genom ett högt portryck. Tidigare mätningar på samma område i augusti-september 2008 gav indikationer på ett samband mellan hög resistivitet och högt portryck.

Mätningarna gjordes med ett s.k. BAT Pore Pressure System. Detta består av ett filter som är kopplat till ett förlängningsrör av plast med en BAT IS Sensor i. Filtret var av MKIII Vadose typ, vilket är gjort för att användas i markens omättade zon. Data samlades in av en logger, och en BAT IS Field Unit användes för att ladda ner data och mäta lufttrycket. P.g.a. den hårda marken krävdes förborring innan installationen av filtren. Borrhålsdiametern var något större än förlängningsrören. Därför användes bentonit för att fylla ut de små mellanrummen mellan rören och marken för att förhindra gasläckage.

Portryck och marktemperatur loggades i varje BAT sensor en gång i halvtimmen under mätperioden 6 november till 21 december. Vissa av sensorerna har dock kortare mätperiod p.g.a. instrumentfel. Portrycket redovisas dels som totalt portryck, vilket är det uppmätta värdet i sensorerna, och dels som skillnaden mellan det totala portrycket och uppmätt atmosfäriskt tryck. Det senare görs för att kompensera för vädervariationer. Mer information om utrustningen och metoden finns i instrumentets manual (www.bat-gms.com) och i Torstensson (1984).

Jordprovtagning och CPT-sounding

Jordprovtagning och CPT-sounding (spetstryck) utfördes den 12 januari 2010 i fyra profiler genom undersökningsytan, för att bestämma materialets sammansättning och markens egenskaper. Längs med vardera profil utfördes CPT-sounding och jordprovtagning i fyra punkter. Profilernas läge framgår av figur 2.5 ovan, där jordprovtagningspunkterna är markerade. Profil A var belägen längs med den näst västligaste resistivitetslinjen (provtagningspunkter 101-104 i figur 2.5), följt av profilerna B (punkterna 105-108), C (punkterna 109-112) och slutligen D (punkterna 113-116). Jordprovtagningarna innebar en klassificering av de täckande jordlagren, samt bestämning av djup ner till avfallslagren. Undersökningarna gjordes med en borrhandsvagn av typen Geotech 604D.



2.4 Steg 3 - Utveckling av metodik i fullskala

Syftet med fältmätningarna i Steg 3 var att utveckla en metodik för effektivt användande av geofysiska mätningar på deponier. Metodiken bygger på en stegvis process där man inledningsvis genomför storskaliga mätningar (cirka 1 ha) över ett deponiområde med flera olika geofysiska metoder för att få en så god uppfattning om deponins uppbyggnad och egenskaper som möjligt. Mätningarna möjliggör en utvärdering och jämförelse av resultaten från respektive metod. De metoder som användes var stångslingram, resistivitet och IP, magnetometri samt reflektions- och ytvågsseismik.

När de storskaliga mätningarna har analyserats valdes ett mindre delområde ut för en mer detaljerad mätning av resistivitet och IP. Dessa mätningar syftade till bättre förståelse av förekomst av vatten och deponigas, samt till en kartläggning av inre strukturer och täckskiktets utseende.

Mätområde

Syftet med fältmätningarna i Steg 3 var att utveckla en metodik för effektivt användande av geofysiska mätningar på deponier (jämför med kapitel 1.3). Metodiken bygger på en stegvis process där man inledningsvis genomför storskaliga mätningar över ett deponiområde med flera olika geofysiska metoder för att få en så god uppfattning om deponins uppbyggnad och egenskaper som möjligt. Mätningarna möjliggör en utvärdering och jämförelse av resultaten från respektive metod. De metoder som användes var stångslingram, resistivitet och IP, magnetometri samt reflektions- och ytvågsseismik. Ett ca 370x160m stort område på Filborna-deponin valdes ut för den storskaliga undersökningen. För de inledande mätningarna med stångslingram, resistivitet och IP samt magnetometri mättes positionerna för 17 linjer in. Dessa mätlinjer är synliga på flygfotot i bild 2.12. Målsättningen var att täcka in så stor del som möjligt av dessa linjer med vardera metod. I sydväst begränsades mätområdet av en asfaltsväg, av en metallbelagd väg. Dessa begränsningar innebar att alla 17 linjer inte blev lika långa.





Figur 2.12. Flygfoto över undersökningsområdet indelat i delområden A, B och C. De 17 storskaliga mätlinjerna är synliga på flygfotot, och området för detaljerade resistivitmätningar är markerat med en streckad linje.

När de storskaliga mätningarna var analyserade valdes ett mindre delområde ut för en mer detaljerad time-lapse mätning av resistivitet och IP. Det ungefärliga läget för den detaljerade time-lapse mätningen av resistivitet och IP är markerad som en streckad ruta i figur 2.12. Två vertikala uttagsbrunnar i de översta skikten av marken är belägna inom detta område, den ena ungefär i mitten av den streckade ytan och den andra strax innanför den nordöstra kanten av ytan.

Stångslingram

Mätningarna med stångslingram utfördes under juni 2010 genom en testmätning i samarbete med GF Instruments. Instrumentet var en elektromagnetisk stångslingram kallad CMD 4/6, skapad av GF Instruments, se figur 2.13.





Figur 2.13. Mätningar med stangslingram och positionering med GPS.

CMD 4/6 möjliggör en snabb och kontaktlös kartläggning av konduktivitet och in-phase i marken. Enkelt uttryckt skapas ett elektromagnetiskt primärfält i marken genom att växelström sänds genom instrumentet. Därefter registreras det sekundära magnetfältet från den inducerade strömmen som skapas i konduktiva kroppar i marken. Det sekundära magnetfältet kan delas in i två komponenter, där in-phase är i fas med primärfältet och out-of-phase (konduktivitet) är fäsförskjutet. Konduktivitet mäts i enheten mS/m, och in-phase definieras som den relativa kvantiteten i ppt (part per thousand) av primärt magnetiskt fält. In-phase är nära relaterat till magnetisk susceptibilitet i det material man mäter på. Djupnedträngningen bestäms av avståndet mellan de magnetiska dipolerna, som sitter i varsin ände av proben. Då de magnetiska dipolerna hålls i vertikalt läge kan proben mäta med s.k. full djupomfång, medan man når hälften av detta djup med horisontellt läge på de magnetiska dipolerna (så som i figur 2.13). Under mätningarna användes problängderna 4 och 6 meter, vilket motsvarar effektiva djupomfången 6.0 m / 3.0 m (half depth) för CMD 4 respektive 9.0 m / 4.5 m (half depth) för CMD 6. Mätningarna utfördes längs hela linjerna 1-17 med både CMD 4 och CMD 6, med undantag för mindre områden där vegetationen var ogenomtränglig med instrumentet. Exakt positionering mättes in med GPS (Trimble) i kontinuerligt läge. För varje mätning genererades ASCII filer med CMD Data Transfer software. Mjukvaran Surfer användes för dataprocessering och tolkning, och resultaten presenterades som konturkartor av skenbar resistivitet (som är detsamma som inversen av uppmätt skenbar konduktivitet) och in-phase.

Storskalig resistivitet och IP

Strax efter mätningarna med stangslingram mättes även resistivitet och IP med ABEM Terrameter LS på linjerna 7 till 17 under perioden 18 till 24 juni 2010. Elektrodkonfigurationen var gradient dipol-dipol med 5 meters elektrodavstånd. Elektroden längs linjen mättes in med GPS (Topcon).

Rådata processerades och inverterades inledningsvis i Res2Sinv (Geotomo Software) och presenterades som 2D-profiler längs med varje linje. Därefter utför-



des en mer datorkapacitetskrävande 3D-inversion i Res3Dinv (Geotomo Software), varefter resultaten kunde presenteras som 3D-volymer.

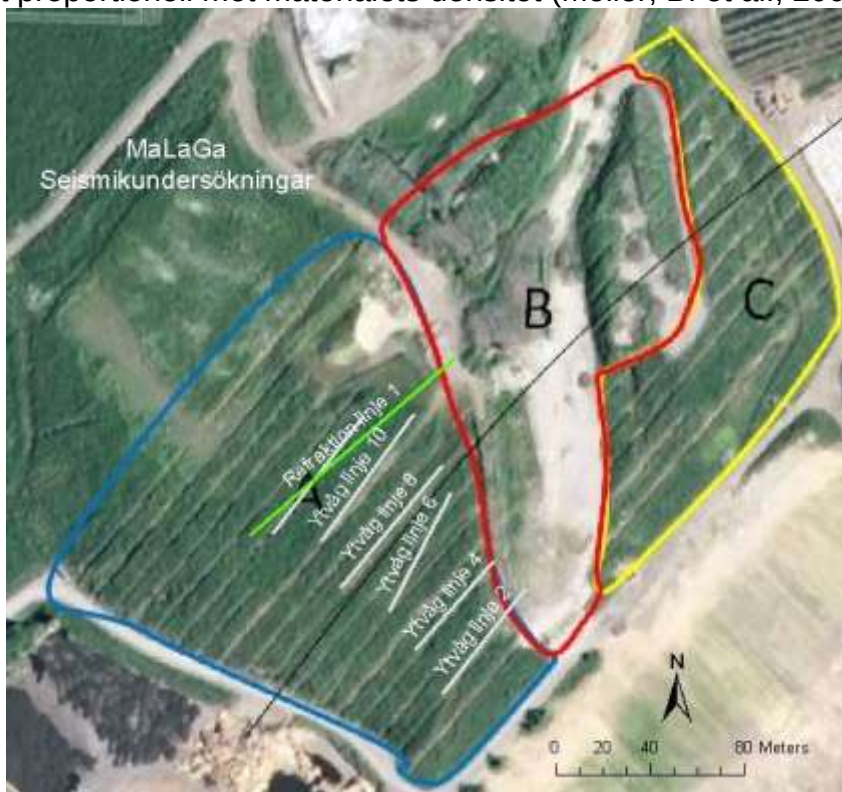
Magnetometri

Magnetometrimätningar utfördes längs med alla 17 linjer med en Geometrics G-858 Cesium Gradiometer i två omgångar; 1 juni och 7 juni 2011. Den magnetiska fältstyrkan (nT), samt gradienten (nT/m) mellan två horisontellt orienterade sensorer mättes. Gradienten reducerar påverkan från dygnsvariationer i det magnetiska totalfältet genom att båda sensorer påverkas lika mycket av dessa variationer. Till instrumentet kopplades en GPS som genererade koordinater längs de uppmätta linjerna. Dock upptäcktes efteråt att GPS värdena hade mycket stora precisionsfel och inte kunde användas i analysen. Försök gjordes att interpolera mellan start och stopp koordinaterna för linjerna, men eftersom mät hastigheten i fält varierade mycket är de enskilda anomaliernas positionering bristfällig.

Refraktionsseismik

Refraktionsseismik mättes den 18 maj 2011 längs med en 115m lång linje i NO-SV riktning, se figur 2.14. Instrumentet var ett Geonics Geode System med 24 stycken 4,5 Hz geofoner. Geofonavståndet var 5 m. 5 skottpunkter sköts längs med linjen med ca 50 g dynamit vardera. Skottpunkternas lägen var -20m, +17,5m, +57,5m, +97,5m och +135m. Mättiden sattes till 1,0 s och mätfrekvensen till 0,125 ms.

Data analyserades för hand och resulterade i kompressionsvågshastigheter för olika lager. Kompressionsvågshastigheten är proportionell mot elasticitetsmodulen och omvänt proportionell mot materialets densitet (Möller, B. et al., 2000).



Figur 2.14. Mätlinjer för refraktion- och ytvågsseismik på undersökningsytan.



Ytvågsseismik

Ytvågsseismik mättes 15 – 16 juni 2011 längs med 6 stycken 50-66m långa linjer i NO-SV riktning. Linjernas läge visas i figur 2.14 ovan. Instrumentet var ett Geonics Geode System med 24 stycken 4,5 Hz geofoner. Geofonavståndet var 2 m. Skottpunkten var belägen 10 m bakom utlägget och de seismiska vågorna alstrades med en slägga och slagplatta av bly. Mätningen utfördes med en s.k. landstreamer som består av en kraftig rem där geofonerna sitter fastskruvade på metallplattor, se figur 2.15. Utlägget förflyttas med en fyrhjuling motorcykel när mätpunkten är avverkad, i detta fall med 10 m intervaller. P.g.a. begränsad framkomlighet kunde som mest 3 mätpunkter per linje utföras, vilket motsvarar 66 m utlägg. Mättiden sattes till 1,5 s och mätfrekvensen till 0,125 ms.

Databehandling och inversion utfördes i programet SurfSeis 2 (Kansas Geological Survey) och resulterade i vertikala profiler av skjuvvågshastigheten som funktion av djupet under markytan. Skjuvvågshastigheten kan ge en uppfattning av materialets hållfasthet och är relaterad till skjuvmodulen genom:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

där v_s är skjuvvågshastigheten, G är skjuvmodulen och ρ är materialets densitet (Möller, B. et al., 2000).



Figur 2.15. Geofon fäst vid en landstreamer.

Detaljerad resistivitet och IP

Baserat på de storskaliga geofysiska mätningarna valdes ett 22x40m stort delområde ut för detaljerad time-lapsmätning av resistivitet och IP under juli 2011, se figur 2.12. Mätuppställningen bestod av 12 parallella linjer med vardera 21 elektroder separerade med ett avstånd på 2 meter. Avståndet mellan linjerna var också 2 meter. Elektrodkonfigurationen var pol-dipol och mätningarna utfördes var tredje timme med ett ABEM Terrameter LS 12-kanalsinstrument. Varje mätcykel



tog ca tre timmar att utföra och resulterade i resistivitet och IP för hela mätområdet.

För datainversionen användes en inversionsmodell med en cellstorlek på 1 meter, så att stora resistivitetsvariationer nära markytan kunde modelleras mer korrekt. Till skillnad från inversionen av data från Steg 2 inverterades alla 3D data set här samtidigt, med en metod som minimerar skillnader mellan modellerna inte bara i rum utan också i tid i syfte att minimera brus. Inledningsvis inverterades 12 dagliga data set mätta vid samma tidpunkt (ca 09.00) mellan den 30 juni och den 11 juli. Med undantag av perioden 2 till 4 juli varierade resistiviteten mycket lite under mätperioden. En andra inversion av samtliga 26 data set mätta med tre timmars mellanrum från den 1 juli kl. 09.00 till 4 juli kl. 09.00 utfördes därefter för att möjliggöra en kartläggning av variationerna under denna period mer noggrant.

Vid sidan om mätområdet installerades en väderstation som kontinuerligt registrerade lufttryck (Setra 278), nederbörd (ARG10, tipping bucket), lufttemperatur (specialgjord sond, mäter 1 m över mark) och marktemperatur (specialgjord sond, mäter 5 cm ner i marken) varje minut. Mätvärdena från väderstationen lagrades i en Campbell C1000 data logger (Campbell Manufacturing).

2.5 Steg 4 – Fallstudier på referensdeponier

Syftet med Steg 4 har varit att utveckla och testa preliminärt framtagen metodik i på ett antal referensdeponier. Mätningar har utförts vid tre deponier:

- SYSAV – Albäcksdeponin Trelleborg
- Stena Metall – Anläggningen i Halmstad
- VETAB – Flishultsdeponin i Vetlanda (Resultat redovisas ej i denna rapport)

I denna rapport redovisas resultaten från mätningarna på Albäcksdeponin Trelleborg (SYSAV) och Stena Metalls anläggning i Halmstad.

Mätningar på Albäcksdeponin (SYSAV) – småskalig metodik utvecklad i Steg 2
Samarbetet med SYSAV på Albäcksdeponin i Trelleborg bygger på hypotesen att gastryckets variationer påverkar flödet av gas i deponin och att detta kan detekteras genom förändringar i uppmätt resistivitet. I denna fallstudie användes alltså metodiken med detaljerade time-lapse mätningar som utvecklats i Steg 2.

Mätningarna på Albäcksdeponin utfördes 2 – 23 september 2011. Försöksområdet täckte en yta på 40 X 22 m. 12 linjer lades ut med ett inbördes avstånd på 2 m mellan linjerna. Elektrodavstånden längs med linjerna var 2 m och elektrodkonfigurationen pol-dipol. Mätinstrumentet var en Terrameter LS från ABEM Instruments AB som kopplades till 4 st reläväxlar modell ES10-64C. Instrumentet fjärrstyrdes från Lunds Universitet via ett modem. Alla instrument placerades i en container med strömförsörjning. Inverteringen av data utfördes i Res3Dinv.

Under mätperioden mättes med jämna mellanrum tryck, flöde och metanhalt i intilliggande gasbrunnar. För att undersöka hur gasförhållandena i deponin påverkar resistiviteten öppnades och stängdes en av brunnarna, enligt ett förutbestämt schema. Övriga brunnar var stängda under mätperioden, men ett test med att öppna samtliga brunnar gjordes 12 september.

Mätningar hos Stena Metall – storskalig metodik utvecklad i Steg 3

Landfill mining är ett intressant utvecklingsområde för Stena Metall eftersom deras deponier innehåller stora mängder metallavfall. För att undersöka möjligheterna att



utnyttja geoelektriska metoder för att särskilja olika avfallstyper genomfördes en pilotstudie på Stena Metalls anläggning i Halmstad under oktober 2011. I fallstudien användes en kombination av olika geofysiska metoder på samma sätt som i Steg 3.

Mätningen utfördes på en hög innehållandes väl avskilda celler med olika depomaterial. Högen var ca 3 m hög, 25 m lång och 16 m bred, se figur 2.16. Cellerna övertäcktes med ett ca 0,5 m tjockt lager av kompostjord. Syftet var att med metoderna resistivitet-IP, magnetometri och stångslingram kunna skilja de olika materialen åt vad gäller ledningsförmåga, uppladdning/urladdningsegenskaper samt magnetiskt innehåll.



Figur 2.16. Hög med celler av olika material på Stena Metalls avfallsanläggning samt de fem resistivetslinjerna.

Den geofysiska undersökningen utfördes 25 - 26 oktober 2011. Resistivetsinstrumentet som användes var ABEM Lund Imaging System, Terrameter LS. Elektrodavståndet var 1 m och mätningarna utfördes med gradientkonfiguration. Mätningen utfördes med separerade kablar för strömelektroder och potentialelektroder, d.v.s. skilda kablar användes för att skicka ut ström och mäta potentialen. Detta är en metod för att minska den kapacitiva kopplingen som uppträder i kablar. Datakvaliteten på IP blir då bättre eftersom den är känslig för störningar, s.k. kopplingseffekter. Resistiviteten påverkas däremot inte nämnvärt genom att använda sig av separerade kablar. Fem stycken parallella resistivetslinjer mättes med 1 m avstånd mellan linjerna. Linjerna var 31 m långa. Mätområdet omfattar således en yta av 31 X 4 m och placerades på mitten av högen, längs med högens långsida. Elektroderna mättes in med en differentiell GPS modell TopCon FC-200. Inverteringen av resistivetsdata utfördes i Res3Dinv.

Mätningar med magnetometer utfördes längs samma linjer som för resistivitet-IP. Till mätningarna användes två stycken magnetometrar, dels en basstation, samt en gradiometer som användes för att mäta vertikal gradient. Basstationen ger totalfältsmätningarna på en specifik position, dessa varierar alltså med tiden (de uppmätta värdena varierar, fast position). Magnetometern som användes var en Geometrics G-858 och basstationen var en Geometrics G-856. För magnetometern gjordes korrigering av totalfältdata m.h.a. data från basstationen.



Mätningar med en stångslingram gjordes längs samma linjer som övriga metoder. En EMP-400 från GSSI användes, med tillhörande handdator och GPS. Handdatorn utför beräkningar under mätning och presenterar sedan data för varje mätt frekvens. Frekvenserna 3, 8 och 15 kHz användes för mätningarna i detta fall. Resultaten från mätningarna med magnetometer och stångslingram har ritats upp som plankartor m.h.a. programvaran Surfer från Golden Software, medan resistivitet och IP ritades upp som 3D-volymer med Voxler från Golden Software.

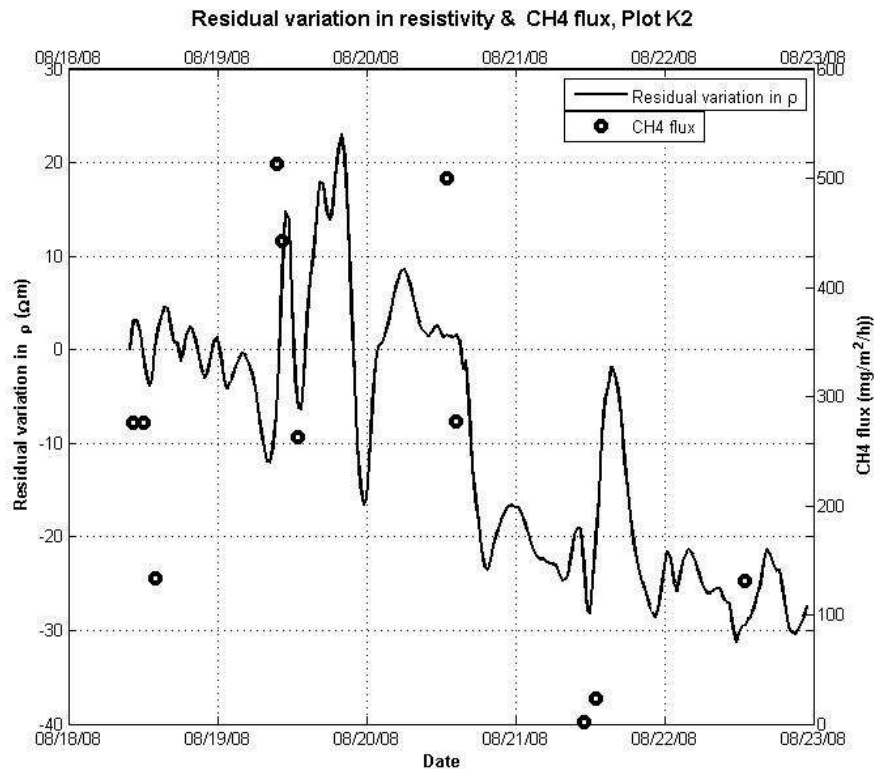
3. Resultat

3.1 Steg 1 – Visualisering av resistivitetsdata från Fas 1

IP-mätningarna från Fas 1 (2008) var av otillräcklig kvalitet och presenteras inte här. Analyserna av resistivitetsdata däremot gav redan i Fas 1 många intressanta möjligheter för fördjupningar i ämnet; bl.a. kunde det visas att resistivitet kan användas för att analysera gasflöden i marken. Dataanalysmetoderna från Fas 1 som gav dessa resultat har publicerats i *Geophysical Journal International* (figurer 3, 4 och 5 i Johansson et al. 2011). Bl.a. korrigerades resistivitetsförändringarna för temperaturvariationer enligt ekvation (2) i kapitel 2.1. Några av de viktigaste resultaten var att man kunde se att intensiv nederbörd gav en minskning av resistiviteten i ytnära lager samtidigt som resistiviteten ökade på djupet, vilket tolkades som att infiltrationen av vatten i marken tvingade ner gasen i djupare lager och därmed ökade gastrycket. Kort efter ökade resistiviteten kraftigt i de ytligare lagren, och höga gasflöden från marken mättes med statisk kammare.

I Fas 1 visualiserades resistivitetsförändringar tvådimensionellt som grafer i ett speciellt område och marklager av deponin, se figur 3.1 (Johansson et al. 2011). I Fas 2 utvecklades nya visualiseringsmetoder för att kunna applicera dessa resultat på hela 3D-volymen av marken. Målsättningen var att ta fram sätt att visualisera data på som underlättar tolkningen av mer svårtolkade resistivitetsdata från Fas 2- Steg 2 (se diskussion i kapitel 4). Förändringar i resistivitetsdata visualiseras genom att resistivitetsvärdena från ett tidssteg subtraheras med data från föregående tidssteg. Procentuell förändring beräknas relativt det föregående tidssteget. I det följande är metoden applicerat på data från Fas 1.





Figur 3.1. Exempel på visualisering av resistivetsförändringar i Fas 1. Grafen visar hur resistiviteten i ett område i översta marklagret strax under mätpunkt K2 varierar under mätperioden. (Johansson et al. 2011).

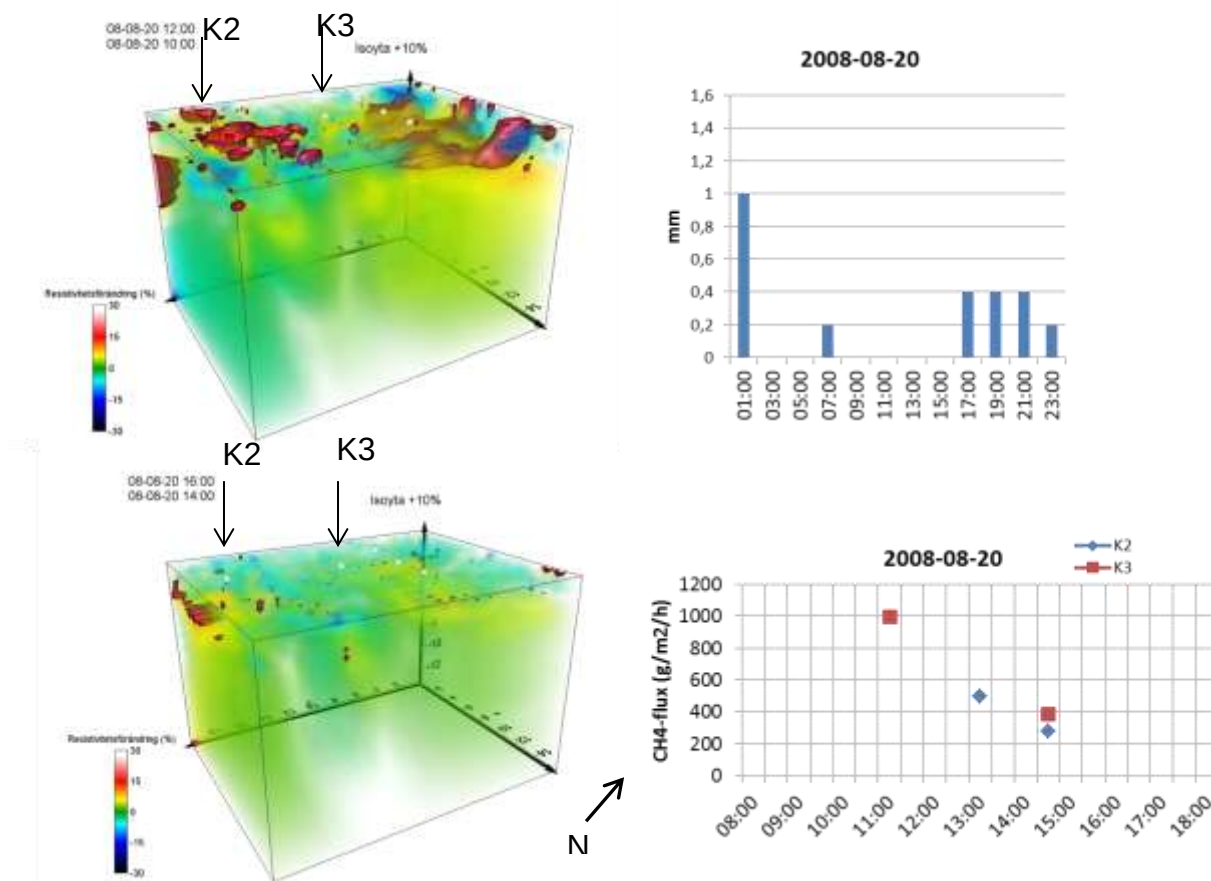
I figur 3.2 visas vilka förändringar som stegvis sker mellan den 18 augusti 2008 mellan kl. 12:00 till 18:00 tillsammans med data över nederbörd och gasflöden. Nederbördsdaten representerar ackumulerad nederbördsmängd över två timmar (d.v.s. en timme före och en timme efter klockslaget på x-axeln). Resistivetsförändringarna vid nederbörd uppvisar några olika mönster. Vid vissa tillfällen minskar resistiviteten som väntat i de övre lagren (figur 3.2 mitten t.v.).



Det är dock viktigt att påpeka att minskningen i resistivitet under perioden 14:00-16:00 (figur 3.2 mitten) inte behöver innebära en markant ökning i markfuktighet. Minskningen kan också helt enkelt bero på att ökningen av resistivitet mellan 12:00-14:00 avspeglas som en minskning 14:00-16:00, alltså en återgång till "ursprungliga förhållanden" i markytan.

Mellan 16:00-18:00 och framåt ökar nederbörds mängden påtagligt. Resistivitetsförändringarna i motsvarande modeller är relativt små, se figur 3.2 (nederst). En möjlig tolkning är att markytan nu blir vattenmättad, och att det därmed inte längre syns några förändringar.

I Figur 3.3 visas resistivitetsmodeller från den 20 augusti kl. 10:00-12:00 och kl. 14:00-16:00 tillsammans med nederbörd- och gasflödesdata. Resistivitetsdatan påvisar hög aktivitet under markytan i modellens högra hälft, och i markytan i vänstra halvan (figur 3.3 överst). Ett ovanligt högt flöde mäts samtidigt i punkt K3 (andra punkten från vänster i figur 3.3) vid 11-tiden. Vid nästa mätning i punkt K3 är resistivitetsförändringarna betydligt mindre, se figur 3.3 (nederst), och gasflödet har minskat med ca 60%.

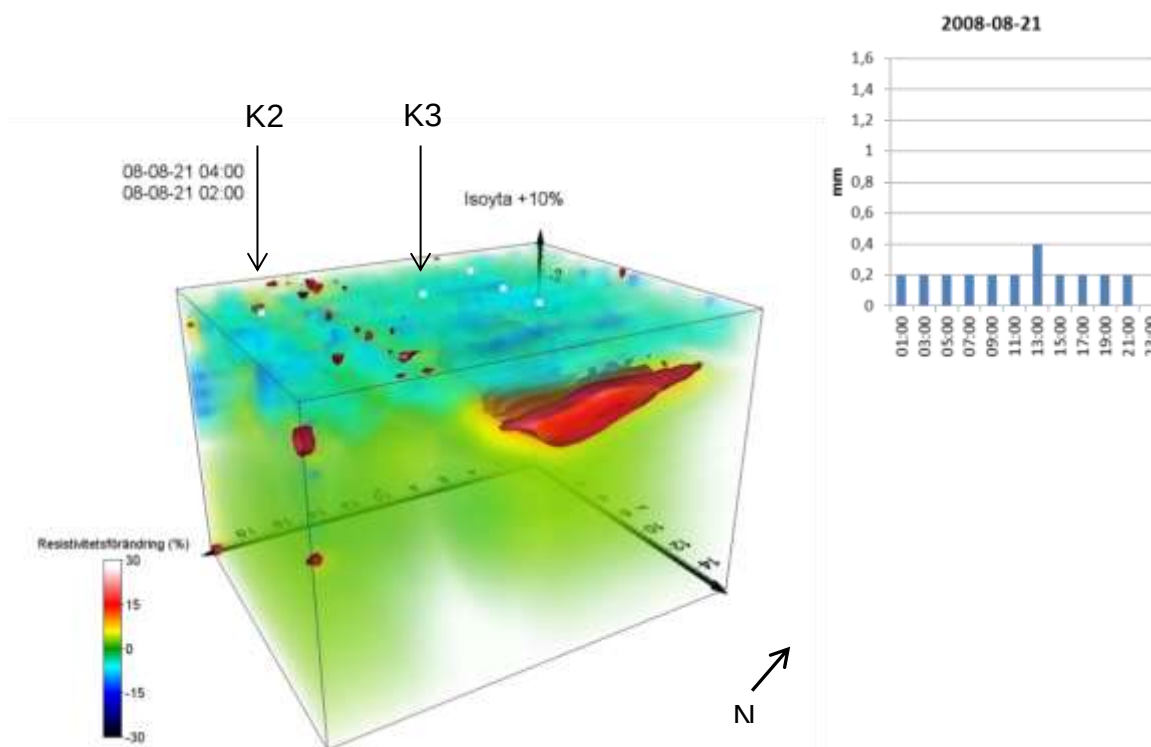


Figur 3.3. Procentuell förändring i resistivitet den 20 augusti 2008 mellan 10:00-12:00 respektive 14:00 till 16:00 tillsammans med nederbörd- och gasflödesdata. Delar av volymen med mycket små förändringar är transparenta.

Intressant i sammanhanget är att det ofta syns stor aktivitet på djupet i modellens högra hälft, se figur 3.3 och ytterligare ett tydligt exempel i figur 3.4. Dock syns mer sällan ökning av resistivitet i ytan här, vilket skulle kunna tyda på att ytmaterialet är relativt tätt och att den eventuella gasen istället släpps ut i modellens



vänstra hälft. Medan det i K2 och K3 (punkterna längst till vänster) ofta uppmättes höga flöden var gasflödena betydligt mindre i övriga mätpunkter (vita markörer till höger i figur 3.4).



Figur 3.4. Procentuell förändring i resistivitet den 21 augusti 2008 mellan 02:00-04:00 tillsammans med nederbördsdata. Inga gasflöden mättes vid detta tillfälle. Delar av volymen med mycket små förändringar är transparenta.

3.2 Steg 2 - Detaljerade mätningar för bättre processförståelse

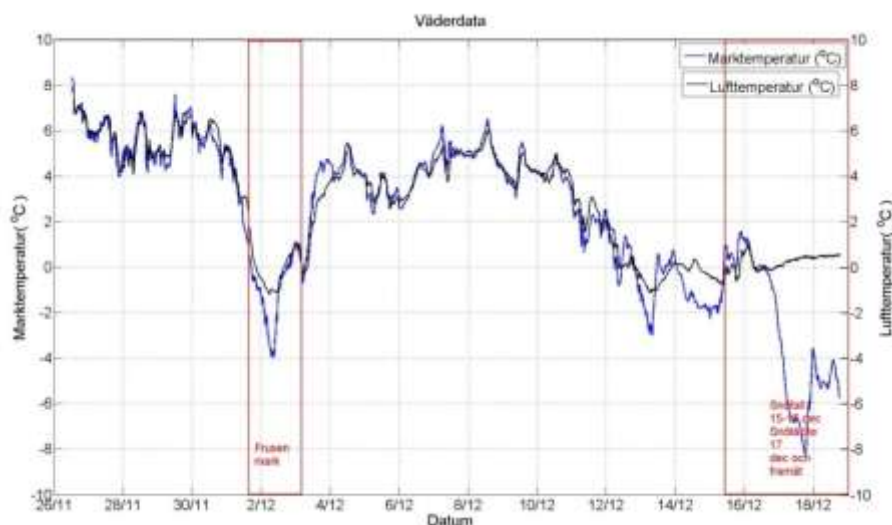
I detta kapitel presenteras resultat från detaljerade mätningar på Filbornadeponin under perioden 11 november till 22 december 2009. De resultat som presenteras är väder- och markförhållanden, gasflödesmätningar vid ytan, mätningar med IR-kamera, porttrycksmätningar samt resistivitetsdata.

Väder- och markförhållanden

Under mätperioden den 26 nov till 18 december varierade väderförhållandena kraftigt. Mellan den 1 och 3 december var marken frusen, varefter marktemperaturen ökade och marken började töa, se figur 3.5 och figur 3.6. Eftersom högt lufttryck är kopplat till klart och molnfritt väder betyder det att luft- och marktemperaturen sjunker vid högt lufttryck på vintersäsongen.

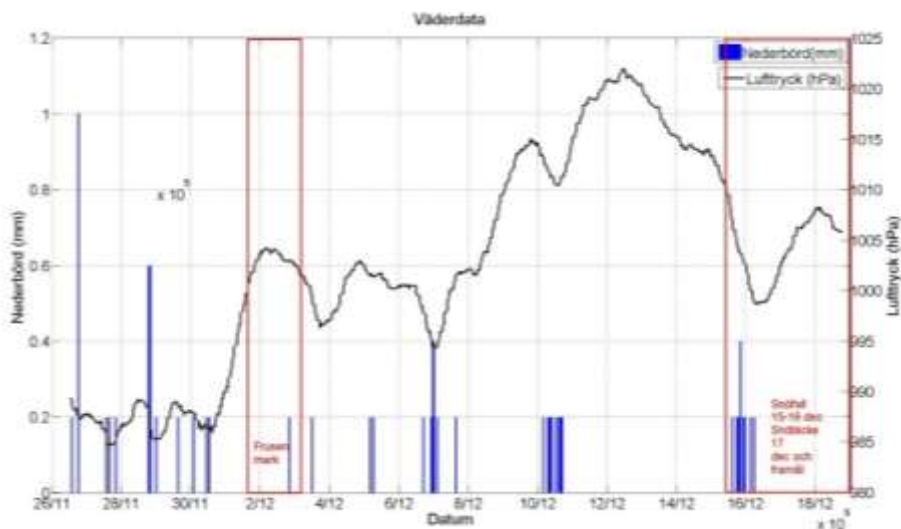
Från den 12 december och framåt började mark- och lufttemperaturen att variera kring 0°C – strecket, och den 15 december började det att snöa. Snöfallet fortsatte under följande dagar, vilket medförde att undersökningsytan var delvis täckt av snö den 16 december och helt snötäckt den 17 december och framåt.





Figur 3.5. Luft- och marktemperatur under undersökningsperioden. Tillfällena då marken var frusen och snötäckt är markerade med röda rektanglar.

I figur 3.6 visas nederbördsmängderna under mätperioden. Nederbörden som föll den 16 december bestod av snö. Förutom detta tillfälle var det främst de kraftiga nederbördstillfällena den 7 och 10 december som påverkade markförhållandena mest genom att göra ett stort avtryck i markfuktigheten (jämfört med markfuktighetsdatan i figur 3.8 nedan). Mellan den 26 november och 6 december har flera täta nederbördstillfällen registrerats, men under denna period hade nederbörden generellt lägre intensitet och förekom med tätare mellanrum.

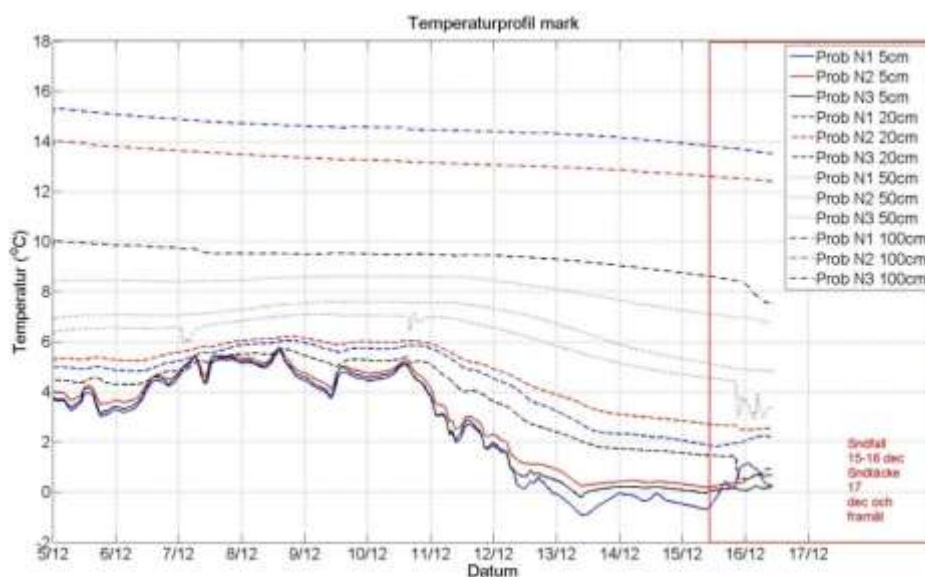


Figur 3.6. Lufttryck och nederbörd under undersökningsperioden. Tillfällena då marken var frusen och snötäckt är markerade med röda rektanglar.

Resultaten av profilmätningarna av marktemperatur var likartad i alla tre prover. Resultaten visar att marktemperaturen ökar med ökat djup under markytan. Relativt stabila dygnsliga variationer syns på 5cm djup under markytan under perioden 16 till 20 november (visas inte här). Variationerna avtar snabbt på djupet. Under perioden 5 till 16 december, som visas i figur 3.7, överskuggas de dygnsliga vari-



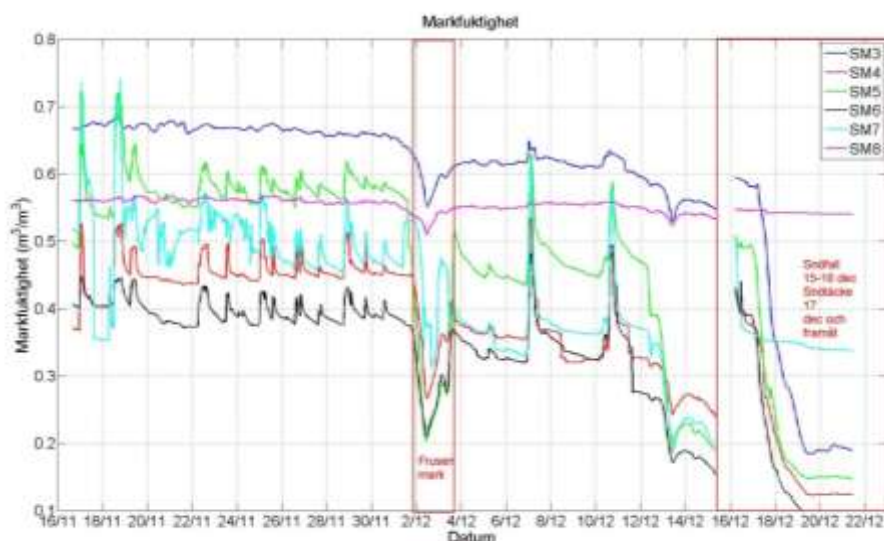
ationerna på 5cm djup av en period av höga marktemperaturer mellan den 7 och 10 december, följt av en period med låga marktemperaturer mellan den 10 till den 16 december.



Figur 3.7. Temperaturproberna N1, N2 och N3 under perioden 5 december till 17 december.

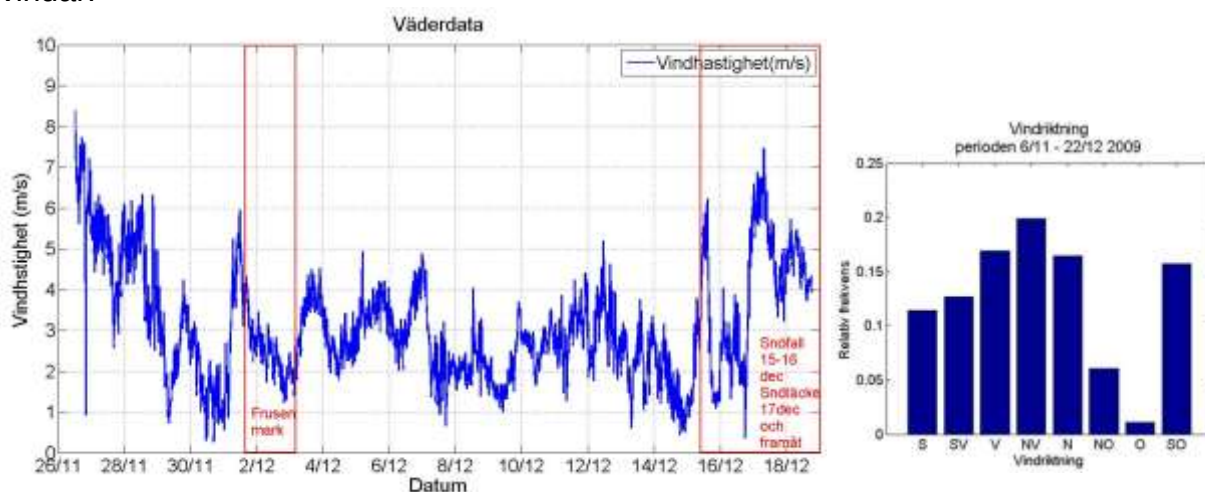
Resultatet av markfuktsmätningarna visas i figur 3.8. Variationerna i markfuktighet är små i sensorerna SM3 och SM8, vilket indikerar att marken är i stort sett vattenmättad på dessa platser. De fyra övriga sensorerna reagerar som väntat med förhöjd markfuktighet då det regnar, varefter värdena kontinuerligt minskar under infiltration och avdunstning efter att regnen upphört. Dippen i samtliga sensorer den 2 och 3 december sammanfaller med de dagar då marken var frusen. Det samma gäller perioden från den 14 december som avslutas med saknad data. De låga värdena kan förklaras genom att is har sämre elektrisk ledningsförmåga än vatten; de låga markfuktighetsvärdena under perioder då minusgrader har uppmätts i markytan är därför inte tillförlitliga. De avtagande markfuktighetsvärdena i slutet av december sammanfaller med snövädret och påföljande snötäcke över undersökningsområdet.





Figur 3.8. Resultaten från de sex markfuktighetssensorerna SM3-SM8 under undersökningsperioden. Tillfällena då marken var frusen och snötäckt är markerade med röda rektanglar.

I data över vindhastighet kan man se att denna generellt understeg 5m/s under större delen av mätperioden, se figur 3.9 (vänster). Denna vindstyrka motsvarar svag till måttlig vind. Vid ett par tillfällen i början och slutet av mätperioden uppgick vindstyrkan till mellan 6 och 8 m/s vilket kan beskrivas som en måttlig vind eller en frisk bris. Vinden har troligen inte påverkat mätningarna av t.ex. gasflöden på något märkbart sätt. Den dominerande vindriktningen under perioden var i nordvästlig riktning (figur 3.9 höger), och minst representerade var nordostiga och östliga vindar.

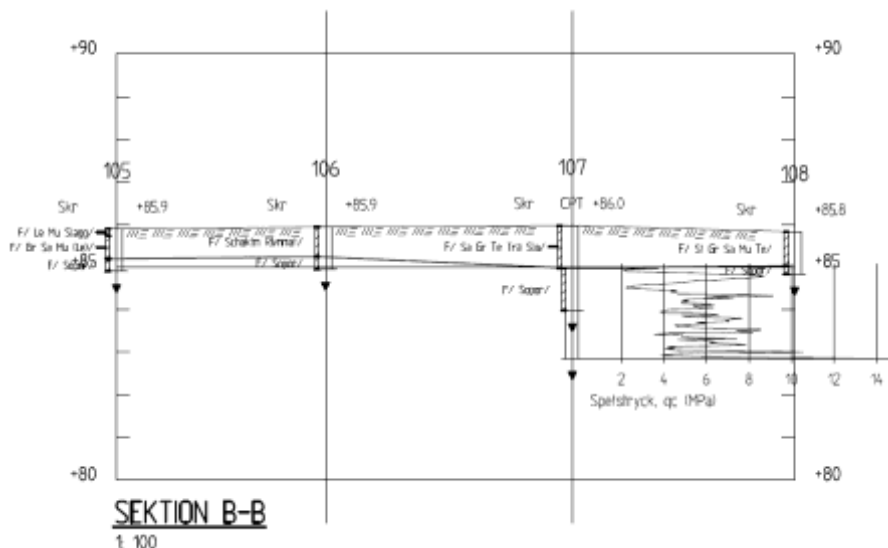
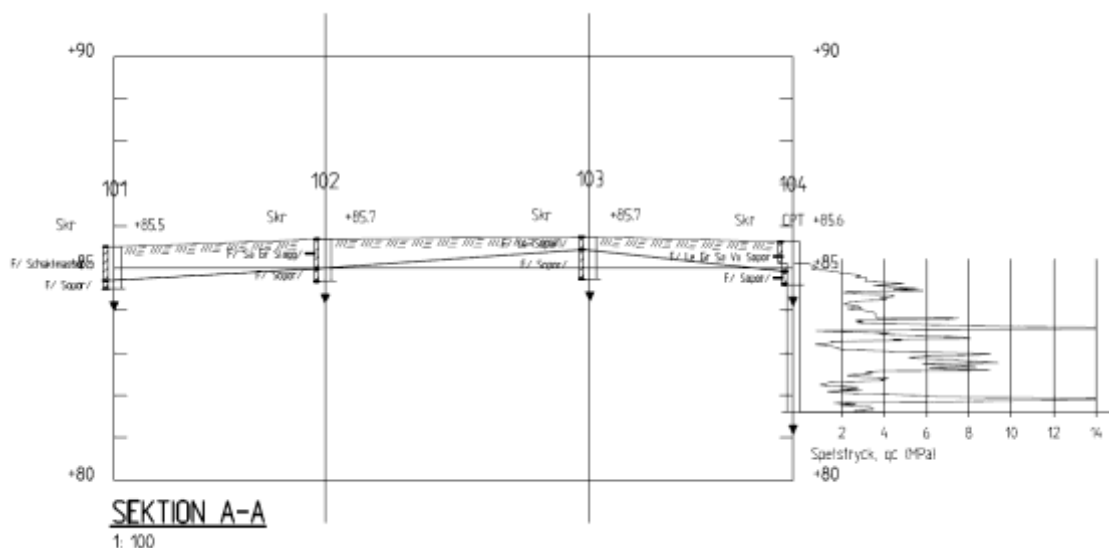


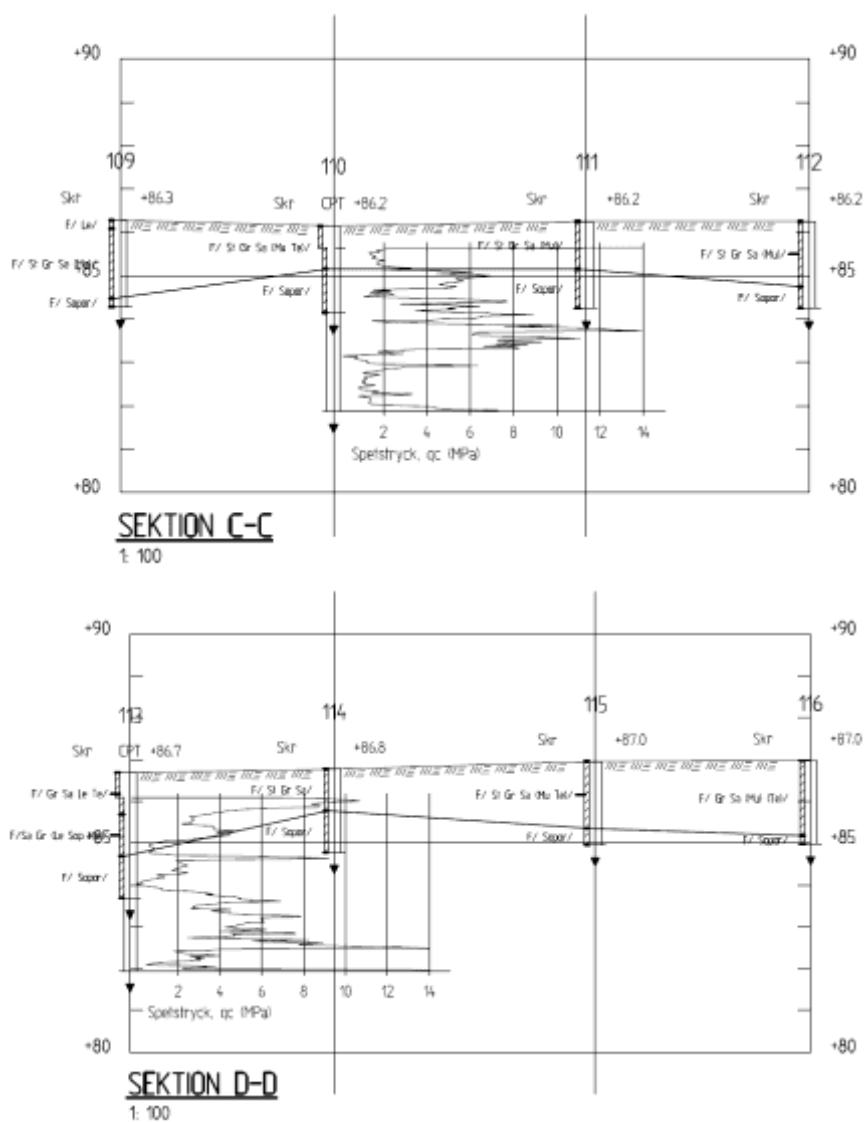
Figur 3.9. Vindhastighet (vänster) och statistik över vindriktningar (höger).

Resultaten av jordprovtagningen och CPT-soundingen visas i figur 3.10. Med hjälp av dessa resultat erhöles en bild av jordlagerdjupet ner till avfallet, se figur 3.11. Avfallslagren var i allmänhet täckta med stenigt grusigt sandigt material blandat med konstruktionsmaterial, tegel, trä etc. I punkterna 103 och 104 klassades det översta jordlagret som leriga sopor. Jorddjupet var generellt lägre i den



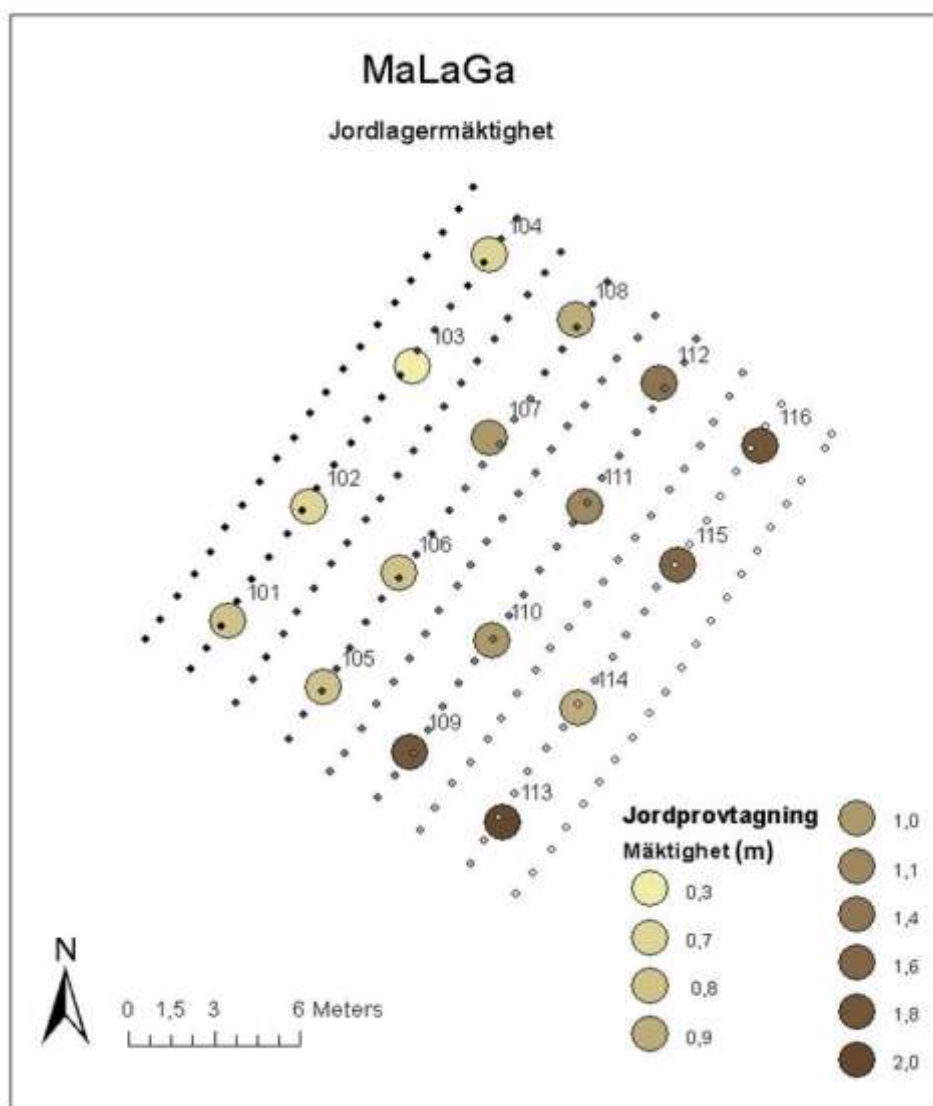
nordvästligaste halvan av undersökningsområdet jämfört med den sydostligaste, vilket beror på att en större del av sluttäckningen togs bort i nordväst. Det finns dock även en variation i jordlagrens mäktighet som antagligen beror på att deponins yta är inhomogen. Som tunnast var jordlagren mellan 0,3 och 0,7 meter i de norra och nordvästligaste delarna av deponin, medan de mäktigaste jordlagren på 1,6 till 2,0 meter återfanns i söder och öst/nordöst. Profilerna B (punkt 105-108) och C (punkt 109-112) är relativt homogena med avseende på jorddjup till avfallslagren, medan det i profilerna A (punkt 101-104) och D (punkt 113-116) finns vardera en punkt där jordlagren är tunnare än övriga. I profil A är jordlagren större än 0,7m i alla punkter utom i punkt 103 där jordlagret är endast 0,3m tjockt. I profil D är jordlagertjockleken i punkt 114 0,9 meter, jämfört med 1,6-2,0 meter på övriga provtagningspunkter i profilen.





Figur 3.10. Resultat av jordprovtagning och CPT-sounding.





Figur 3.11. Jordlagrets mäktighet (m) i förhållande till elektrodena.

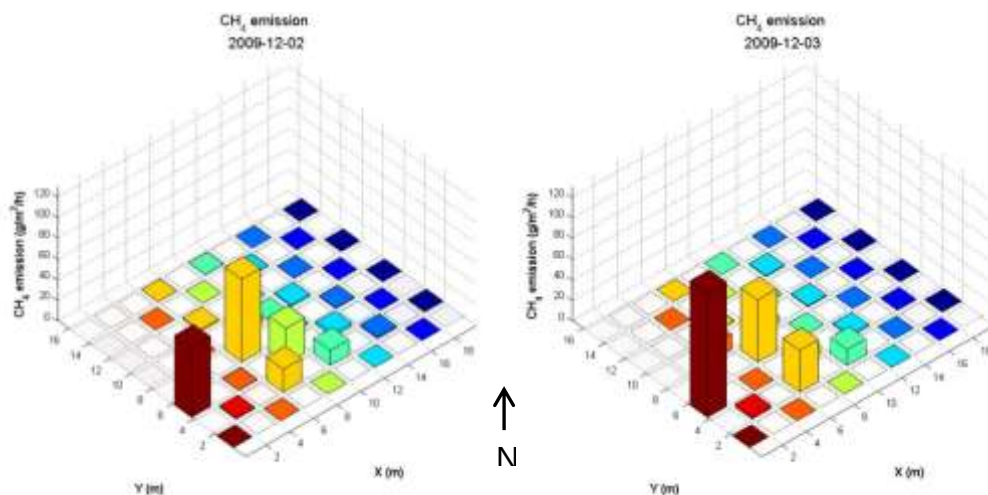
Gasflödesmätningar vid markytan

De rumsliga mätningarna av gasflöden som utfördes av Institutionen för markvetenskap på Hamburgs Universitet (Institute of Soil Science, University of Hamburg) påvisade höga emissioner i en begränsad del av ytan vid Y=0-8 m och X= 0-10 m (se figur 3.12). Mönstret var likartat under både den 2 och 3 december, även om storleken på gasflödena förändrades relativt mycket mellan de båda mätningarna. Även mätningarna av porgassammansättning på 20cm djup under markytan indikerade rumslig variabilitet (se figur 3.13). Dock skiljer sig distributionen av CH₄ -koncentrationen i marken från CH₄-flödena från markytan. Detta indikerar antingen att metanoxidation förekommer i de översta 20cm av markytan, eller att markytan är lågpermeabel på vissa områden vilket förhindrar gasflöden från markytan även om gaskoncentrationen i marken är hög. Det faktum att marken var frusen under den 2 och 3 december då gasflödesmätningarna utfördes kan sannolikt vara en förklaring till låg permeabilitet i markytan under dessa dagar. En jämförelse mellan CH₄ och O₂ koncentrationer i porgasen (figur 3.13) indikerar att syrenivån ofta är hög i de områden där metankoncentrationen är låg, vilket kan indikera antingen

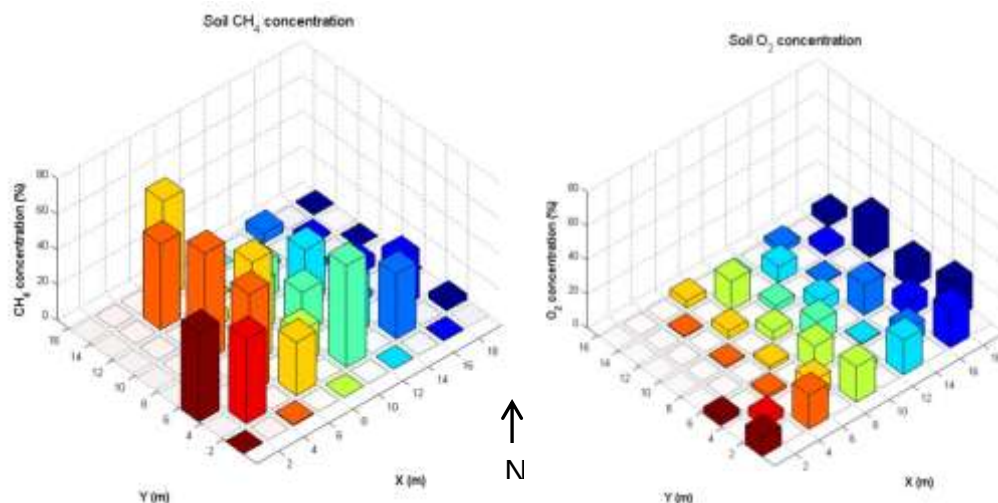


förekomst av metanoxidation eller hög permeabilitet i marken e båda mätningarna ger en grov bild av syrefria respektive syrerika områden i undersökningsområdet.

De ytnära koncentrationerna av CH_4 och CO_2 i luften visas inte här, men den rumsliga distributionen av CH_4 koncentration i luften påvisar ett likartat mönster som gasflödesmätningarna i figur 3.12.



Figur 3.12. Resultat av mätningarna av CH_4 -flöden från markytan den 2 och 3 december.



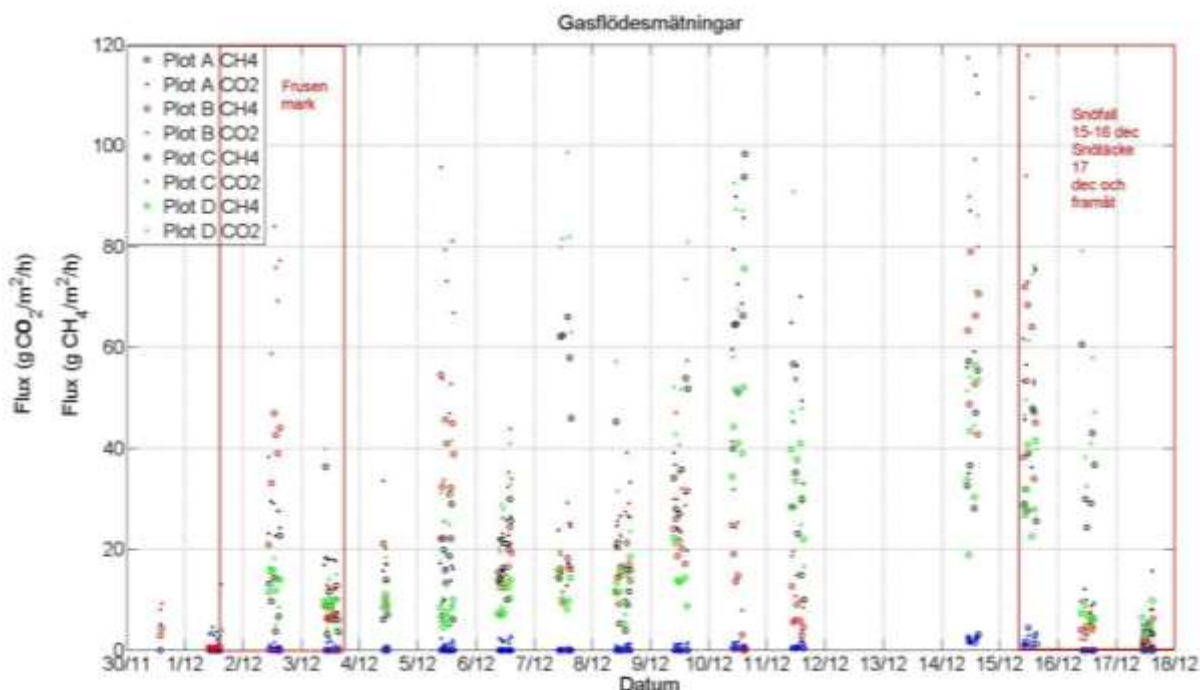
Figur 3.13. Resultat av mätningarna den 3 december av CH_4 - och O_2 -koncentration på 20cm djup under markytan.

Gasflödena varierade mycket över tid på de fyra fasta undersökningspunkterna A-D. Det fanns även stora variationer mellan punkterna, både med avseende på flödenas storlek och hur de varierade. Resultaten visas i figur 3.14.



På mätpunkt A var både CO₂- och CH₄ – flödena mycket låga, vilket kan bero på antingen att markytan har låg permeabilitet här eller på att det inte finns några större gasansamlingar i marken. Mätningen av markgasens rumsliga O₂-förekomst som utfördes av Hamburgs Universitet indikerar relativt hög O₂-koncentration och låg CH₄-koncentration i denna del av deponin. Aerobiska förhållanden i marken skulle kunna förklara varför inga CH₄-flöden utan endast små CO₂-flöden kunde mätas på punkt A mellan den 30 november och den 9 december. Efter det större regnet den 10 december börjar små mätbara flöden av CH₄ synas på punkt A. Detta indikerar att metanoxidationen i marken minskat p.g.a. det intensiva regnet.

Medelvärdena på gasflöden var i samma storleksordning på mätpunkterna B, C och D, men variationsmönstret var olika mellan punkterna. I punkt C och D uppmättes särskilt höga gasflöden under och efter de större regnen den 7 respektive 10 december. En trolig förklaring till detta är att gstrycket i marken byggs upp vid intensiva regn och tvingar deponigas till atmosfären, ett mönster som även sågs under 2008 års mätkampanj på Filbornadeponin (Johansson et al., 2011). Även mellan den 15 och 16 december (när det snöade) var flödena relativt stora också på punk C och D. På punk B däremot uppmättes särskilt höga värden den 2 december (när marken var frusen), 5 december samt den 15 till 16 december. Den 17 december, då det låg ett tjockt snötäcke över undersökningsytan, var gasflödena låga på samtliga mätpunkter.



Figur 3.14. Resultat av långtidsmätningarna av CH₄- och CO₂-flöden på mätpunkterna A-D.

Figur 3.15 visar en summerande bild över resultaten av de tre olika slags CH₄-mätningarna. Den rumsliga distributionen av CH₄-flöden mätta av Hamburgs universitet den 3 december visas tillsammans med medelvärdena av CH₄-flöde i mät-

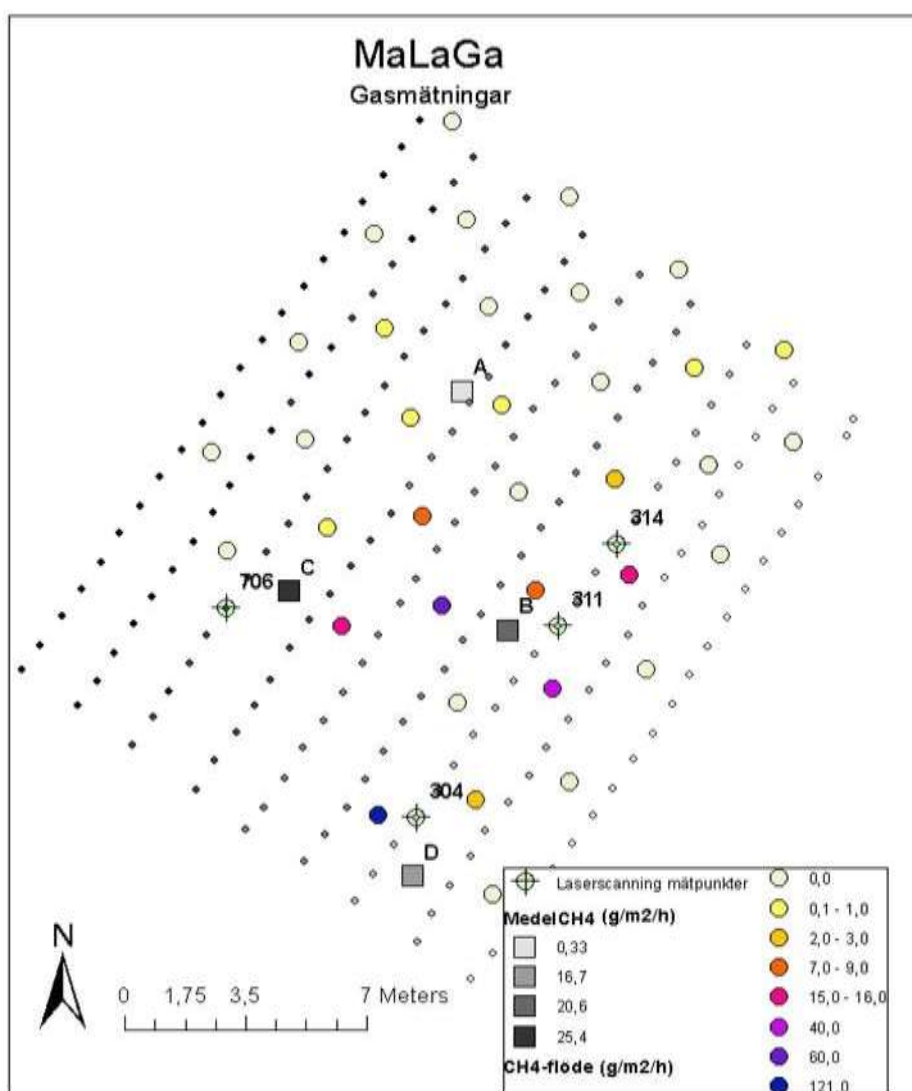


punkterna A-D under perioden 30 november till 18 december, och mätpunkterna där CH₄-utsläpp påvisats med laserscanning.

Laserscanningen indikerade små utsläpp av CH₄ nära elektrod nummer 706 (se figur 3.15) vid de två mättillfällena den 17 och 19 november. Vid mättillfället den 14 december hittades CH₄-läckage nära elektroderna 311 och 314, och vid elektrod 304 indikerades CH₄ både den 14 och 15 december. Trots snötäcket under den 17 och 18 december uppmättes utsläpp av metan fortfarande vid elektrod 304.

Genom att jämföra de tre mätmetoderna (d.v.s. långtidsmätningar respektive rumslig distribution med statisk kammare samt laserkoncentrationsmätningar) i figur 3.15 kan en viss samstämmighet indikeras. I området kring mätpunkt A påvisades väldigt låga CH₄-flöden genom både långtidsmätningen i mätpunkt A och Hamburg universitets ytscanning. Längst i söder i mätområdet uppmättes det högsta CH₄-flödet av Hamburgs universitet, 121 g m⁻² h⁻¹, den 3 december då marken var frusen. Strax intill, vid elektrod 304, påvisades CH₄-utsläpp med laserscanningen vid fyra mättillfällen, inklusive den 17-18 december då ett tjockt lager av snö täckte undersökningsytan. Medelvärdena i mätpunkterna B, C och D är höga och ligger alla i närheten av mätpunkter från Hamburgs universitet där flödet är 15 g m⁻² h⁻¹ eller mer. En bild av området framträder, där man ser ett område med höga CH₄-utsläpp i mitten av undersökningsområdet och söderut. Runt omkring detta område och särskilt norrut är CH₄-utsläppen däremot låga.



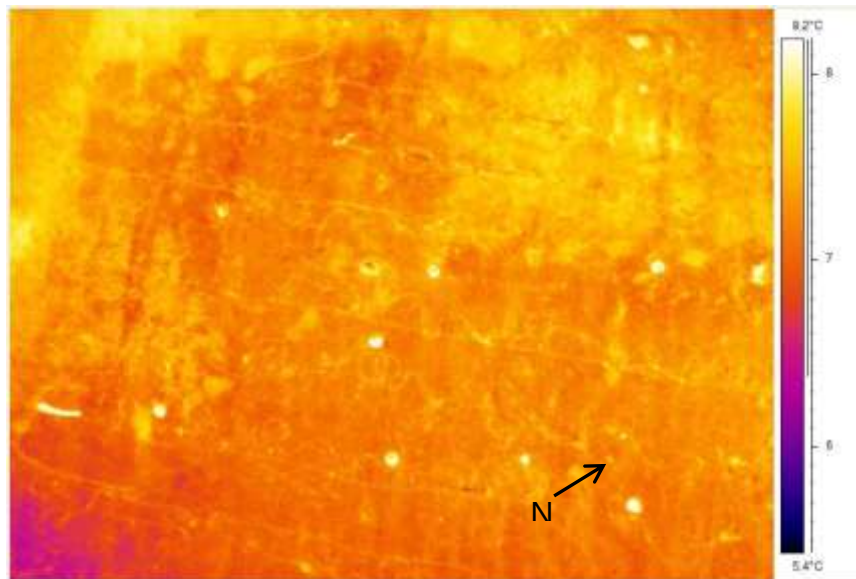


Figur 3.15. Sammanfattande resultat av rumsliga och temporära mätningar av gasflöden samt laserscanning.

IR-kamera

Hypotesen att gasemissioner kunde synas med IR-kamera gav negativt resultat; marktemperaturen var oftast jämnt distribuerad över markytan. Däremot fångades ett par andra intressanta processer av IR-kameran. Den 28 november syns det hur ett nederbördstillfälle gradvis fuktar ner markytan genom att temperaturen minskar. Den 1 december kan man se ökande temperaturskillnader, antagligen p.g.a. att marken fryser, och den 6 december syns det hur markytan blir gradvis varmare, vilket i detta fall troligen beror på nederbörd. Resultaten av mätningarna visualiseras bäst med animationer, men ett exempel på en bild tagen med IR-kameran visas i figur 3.16.

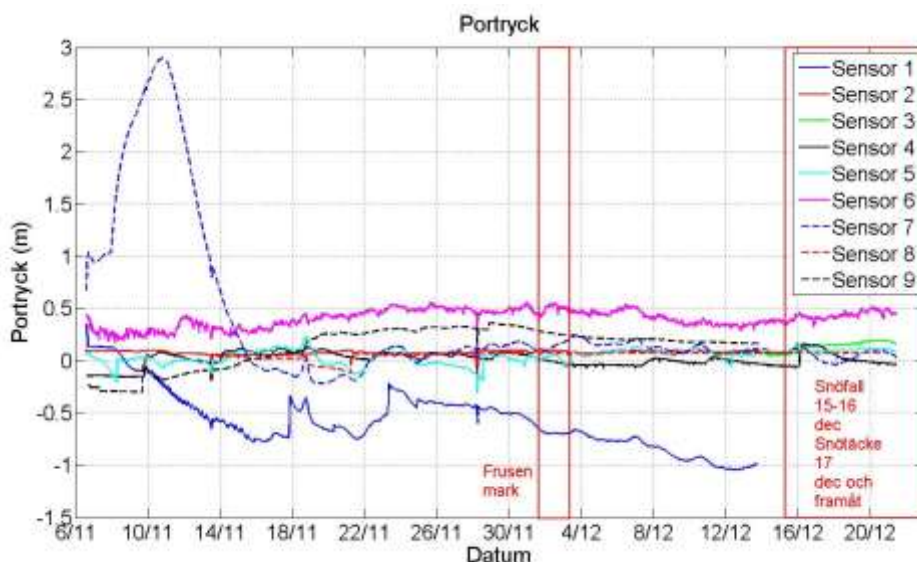




Figur 3.16. Bild med FLIR kamera av mätområdets markyta. Strecket till vänster är värmekabeln.

Portryck

Resultat från portrycksmätningar, som skulle kunna påvisa gas, antogs vara högt portryck alternativt en hög variation i portryck som inte följer atmosfärstrycket. Generellt var portrycket lågt i alla punkter, och både positiva och negativa värden har registrerats. Resultaten av mätningarna visas i figur 3.17. De högsta portrycken mättes i sensor 6, sensor 9 och särskilt i sensor 7 där en jämförelsevis mycket stor topp syns kring den 10 november. Störst variation över tid syntes i sensor 1, 7 och 9.



Figur 3.17. Portrycksvariationer i samtliga nio sensorer.

Om man jämför portrycket med atmosfärstrycket kan man få en bild över i vilka sensorer portrycket uppför sig annorlunda än atmosfärstrycket, och därmed troligen inte står i kontakt med luften genom eventuellt läckage. Variationer i portryck kan därmed mer sannolikt bero på en variation i gastrycket. Medan portrycket i



sensorerna 2 och 8 samt i mindre grad även 3 och 4 varierar på ett likartat sätt som atmosfärstrycket, är graden av likhet låg i sensorerna 1, 7 och 9. Portrycket i sensorerna 5 och 6 hamnar någonstans mittemellan. Tabell 3.1 visar sammanfattande data från portryckssensorerna. De data som mest sannolikt skulle kunna indikera närvaro av gas har markerats med rött. Baserat på dessa data borde det vara mest sannolikt att finna gas i någon av sensorerna 1, 6, 7 eller 9, då dessa till någon grad uppfyller en eller flera av de kvalitativa kriterier som beskrivits ovan.

Tabell 3.1 Jämförelse mellan alla sensorer över hela mätperioden (091106-091221). Vissa sensorer har dock kortare mätperiod.

		Portryckets storlek	Portryckets variation över tid	Grad av likhet med atmosfärstryck
Sensor	Djup (m)	P Max (mH2O)	Spann (mH2O)	Likhet
1	1.5	0.15	1.20	Låg
2	1.5	0.1	0.05	Hög
3	0.8	0.2	0.15	Medel/hög
4	1.5	0.15	0.30	Medel/hög
5	0.8	0.25	0.45	Medel
6	1.5	0.55	0.35	Medel
7	1.5	2.8	3.00	Låg
8	0.8	0.08	0.20	Hög
9	0.8	0.35	0.65	Medel/låg

I sensor 1, 5 och 7 syns små toppar i portryck under den 18 november, se figur 3.17. Det finns ingen väderdata tillgänglig förrän den 26 november, men i markfuktsdata kan man se att markfuktigheten ökar kraftigt vid markytan under den 18 november för att sedan infiltreras i marken. Man kan därför dra slutsatsen att ett kraftigare regn förmodligen har påverkat portrycket på något sätt i sensor 1, 5 och 7, eventuellt genom att vattnet tillfälligt täpper igen markporerna och därmed ökar gastrycket vid sensorerna. Liknande mönster syns mycket svagt vid de kraftigare regnen den 7 och 10 december. Sensor 1, 5 och 7 ligger all i den östra halvan av undersökningsområdet som är högst beläget och generellt torrare än den västra sidan.

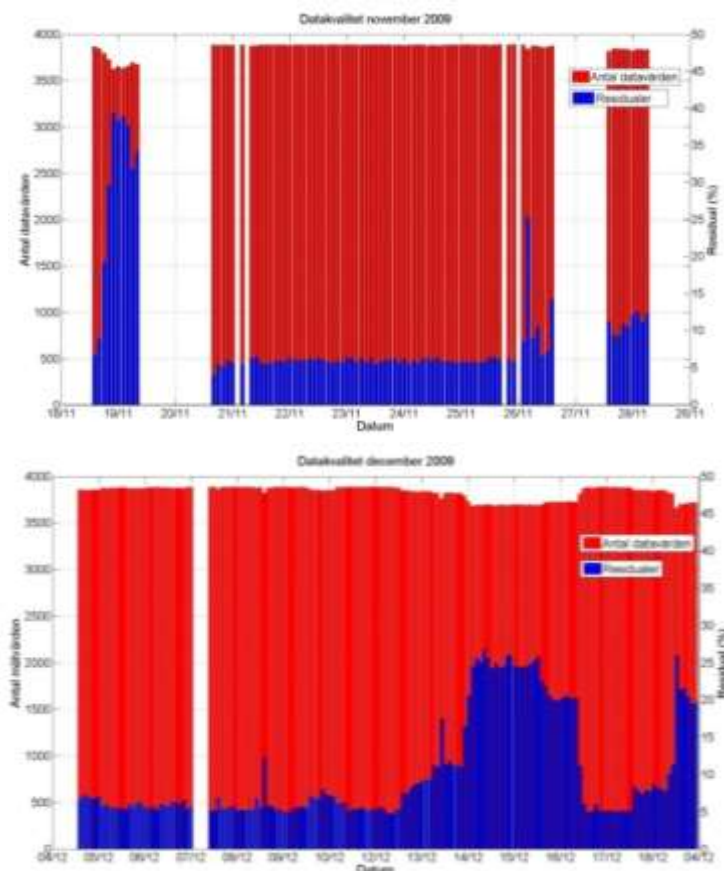
I sensor 4 stiger portrycket med ett hopp den 16 december, då ett snötäcke har börjat bildas på undersökningsytan. Ett liknande beteende kan mycket svagt anas även sensor 3. Dessa båda sensorer har en medelhög till hög överensstämmelse med atmosfärstrycket, men då detta minskar i början av 16 december (se figur 3.2 ovan) beter sig portrycket på rakt motsatt sätt den 16 december (figur 3.17). En möjlig tolkning är att snön, på samma sätt som regn, täpper till markporerna och gör att gastrycket stiger i marken innan gasen hittat nya vägar ut.

Resistivitetsdata

Kvaliteten på resistivitetsdatan var varierande under fältkampanjen. I figur 3.18 (överst) visas antal mätvärden (rött) och residualer (blått) över alla resistivitetsdataset under perioden 18 till 28 november. Residualer syftar till skillnaden mellan resultaten av inversionen och de uppmätta värdena, alltså hur väl resistivetsmo-



dellen representerar mätvärdena. Motsvarande för perioden 4 till 20 december visas i figur 3.18 (nederst).



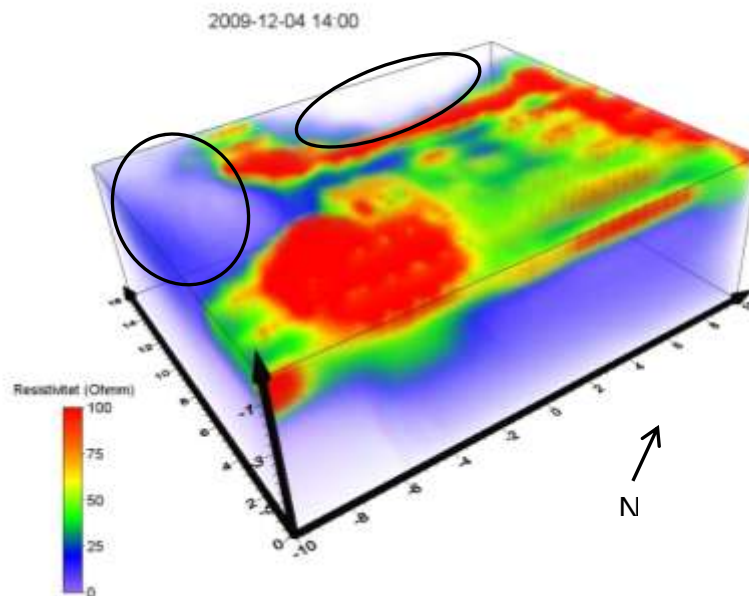
Figur 3.18. Antal datapunkter (rött) och residualer (blått) för samtliga resistivetsmätningar. Överst: Perioden 18-28 november. Nederst: Perioden 4-20 december

Som man kan se i figur 3.18 fattas resistivetsdata från några tidpunkter (t.ex. 7 december). Under andra perioder är datan av oacceptabelt dålig kvalitet (höga residualer och färre antal mätpunkter, t.ex. 11 till 15 december) och har därför ren-sats ut ur datasetet. Resultatet blev flera glapp i tidsserien av resistivetsmätningar.

I vissa punkter mättes vid några tillfällen värden som översteg 10 000 Ωm . Dessa värden är orealistiska och har tagits bort från datan. Den troligaste anledningen till dessa höga värden är att de uppkommer när marken fryser, och därför stör resistivetsmätningarna genom att skapa "artefakter" av väldigt höga motstånd i marken när den fysiska förändringen i marken är att vatten (god ledare för ström) ändrar tillstånd till is (dålig ledare för ström).

Figur 3.19 visar en resistivetsmodell från den 4 december. De storskaliga strukturer som man ser här var i stort sett konstanta under hela mätperioden. De två områden vid markytan där resistiviteten är mindre än 50 Ωm motsvarar de två områden där markytan var synligt vattenmättad under undersökningsperioden. Med undantag av detta är resistiviteten i flera områden vid markytan större än 100 Ωm , medan resistiviteten på djupet var mycket låg; ca 2 meter ner under markytan var resistiviteten konstant mindre än 30 Ωm .

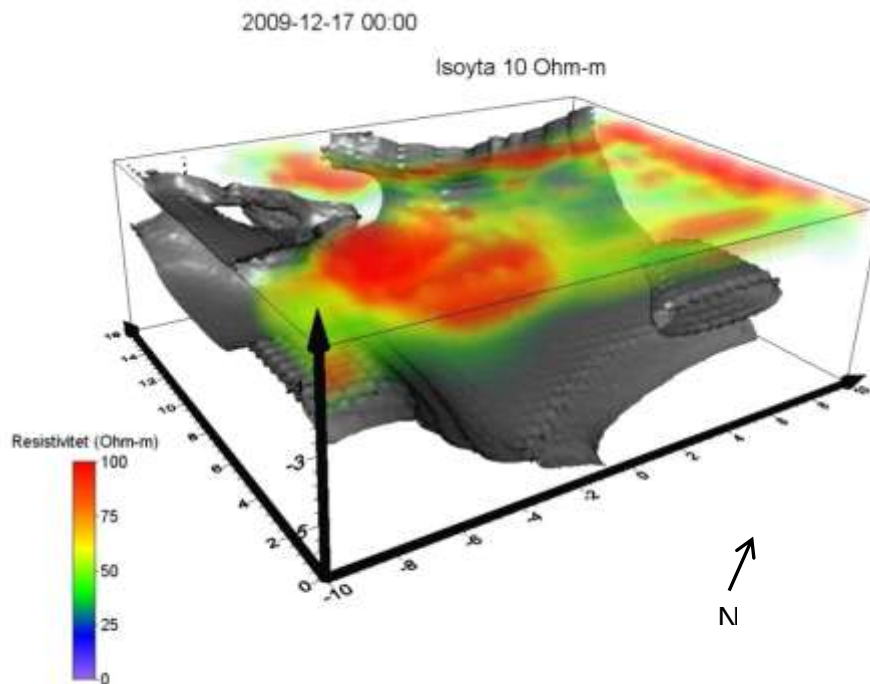




Figur 3.19. Resistivetsmodell från den 4 december. Vid markytan vattenmättade områden är markerade.

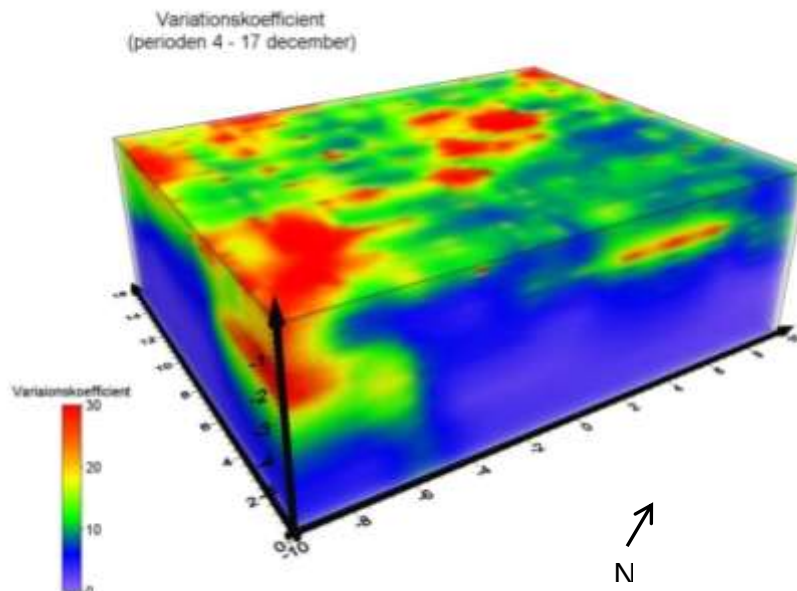
I figur 3.20 visas en transparent resistivetsmodell från den 17 december tillsammans med en isoyta motsvarande isovärdet $10\Omega\text{m}$ (analogt med isolinjer på en karta). Resistiviteten minskar generellt med ökat djup under markytan, vilket är synligt i figur 3.19. Isoytan illustrerar på så sätt att resistiviteten på samma djup är lägre i den sydvästra halvan av undersökningsområdet jämfört med den nordöstra, eftersom isoytan befinner sig djupare ner i nordöstra halvan. Det finns också en zon under markytan i nordöstra delen av deponin där resistiviteten är lägre än omgivningen.





Figur 3.20. Resistivetsmodell från den 17 december (transparent) med en isoyta som representerar isovärdet $10\Omega\text{m}$.

Variationskoefficienten för alla användbara dataset mellan den 4 och 17 december visas i figur 3.21. Resistiviteten varierar mest i det södra hörnet av undersökningsområdet där stora variationer når 4 meter under markytan. För övrigt är det mest i spridda ytor vid markytan som resistiviteten varierar som mest.

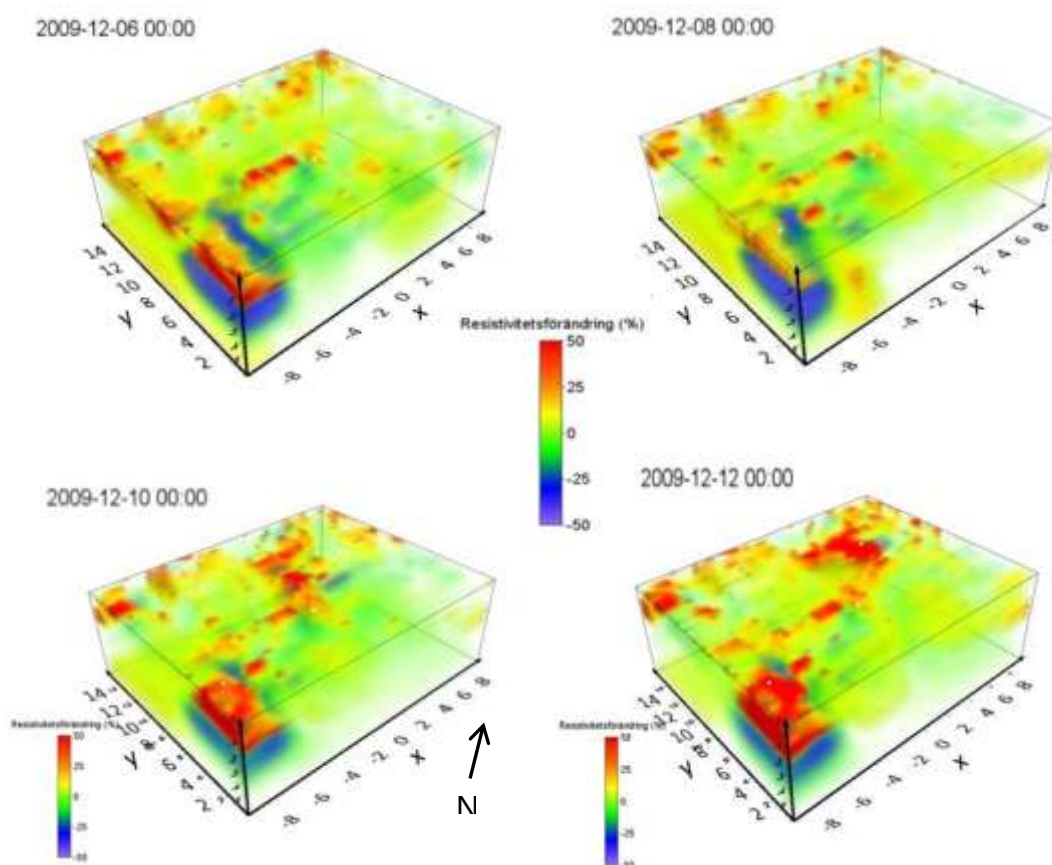


Figur 3.21. Variationskoefficienten under perioden 4 till 17 december.

I figur 3.22 visas hur resistiviteten i markvolymen förändras steg för steg under perioden 6 december (00:00) till 12 december (00:00). En resistivetsmodell



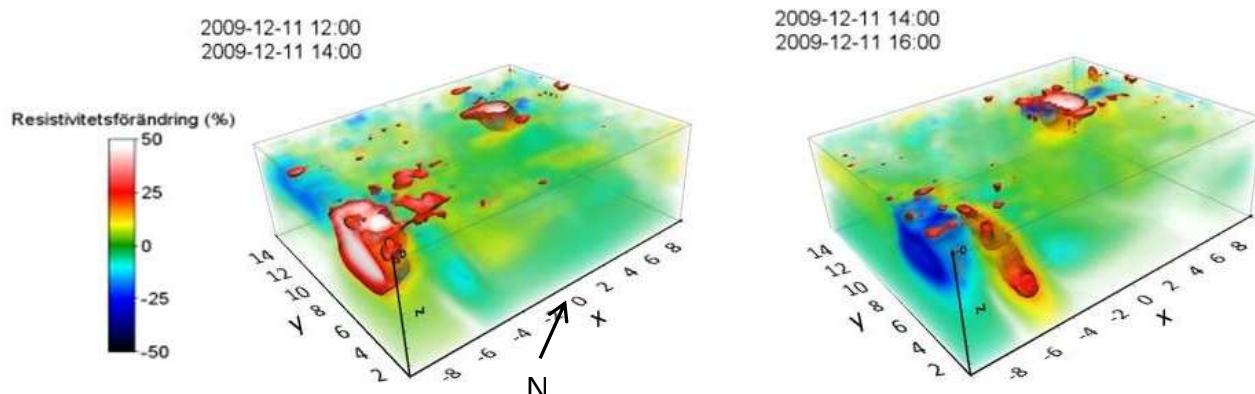
vartannat dygn visas här, och resistiviteten visas som resistivitetsförändring i procent relativt ett och samma mätillfälle (4 december 14:00). Förändringarna är stora; färgskalan har givits intervallet -50% (blått) till +50% (rött), men värdena överstiger i många fall en femtioprocentig förändring med råge. Generellt kan man se att resistiviteten ökar i flera mindre områden vid markytan (och i vissa fall ner till 2-3 meter under markytan) under perioden 4 till 12 december. Samtidigt minskar resistiviteten kraftigt i ett större men begränsat område längst i söder (vid koordinaterna $x=-10$ till -4 m och $y=0$ till 8meter) på ca 3-4 meters djup under markytan. Förmodligen är det kompostvallen man ser här, eftersom strukturen ligger på ungefär rätt position. Om marken i området i västra/sydvästra hörnet av undersökningsområdet (mellan ca $y=8$ till 16m och $x=-10$ till -6 m) inte hade varit mättad med vatten hade anomalin förmodligen löpt vidare tvärs över hela undersökningsområdet längs med den förmodade kompostvallen, men eftersom vattenhalten där är mättad ser man inte så kraftiga förändringar genom att jämföra olika mätillfällen. Då jorddjupet på täckmaterialet är ca 2 meter i södra hörnet är det rimligt att anta att den högresistiva anomalin här motsvarar en ökning av mängden gas i de täckande jordlagren, medan den lågresistiva anomalin därunder motsvarar det område i kompostvallen varifrån gasen rör sig till ytligare jordlager. En förmodad gastransport från ett omättat område i den porösa kompostvallen skulle rimligtvis kunna leda till att vatten migrerar från den vattenmättade zonen i kompostvallen till den omättade, och därpå orsakar ytterligare minskning i resistivitet.



Figur 3.22. Procentuell förändring i resistivitet jämfört med den 4 december 2009. Överst (vänster) 6 december, överst (höger) 8 december, nederst (vänster) 10 december och nederst (höger) 12 december.



I figur 3.23 nedan har ett tidssteg jämförts med det föregående, för att illustrera vilka förändringar som sker i markvolymen mellan två mätningar. Den horisontala strukturen i nedre vänstra delen av volymen indikerar förändringar i området där en kompostvall är belägen. I kompostvallen finns en horisontell gasdränering. Figur 3.23 indikerar höjning och sänkning av resistivitet i området i och kring kompostvall och gasdränering vilket tolkas som gasrörelser.



Figur 3.23. Procentuell förändring mellan två efterföljande tidssteg. Vänster: förändringen mellan den 11 december kl. 12.00 till den 11 december kl. 14.00. Höger: 11: e december 14:00 till 11 december 16:00.

De förändringar som är synliga då man visualiserar ett tidssteg jämfört med det tidigare förekommer ofta i samma områden som i figur 3.23, d.v.s. i närheten av kompostvallen. Gasen verkar på denna tidsskala vandra fram och tillbaka mellan specifika områden, medan nettoeffekten över längre tid är mer lik det mönster som ses i figur 3.22.

3.3 Steg 3 - Utveckling av metodik i fullskala

I Steg 3 har en metodik för applikation i full skala tagits fram och testats. Metodiken bygger på en stegvis process där man inledningsvis genomför storskaliga mätningar över ett deponiområde med flera olika geofysiska metoder för att få en så god uppfattning om deponins uppbyggnad och egenskaper som möjligt. Därefter genomförs undersökningar i mindre skala. Metodiken bygger på mätningar med stångslingram, resistivitet och IP, magnetometri, samt refraktions- och ytvågsseismik.

Mätområde – historik

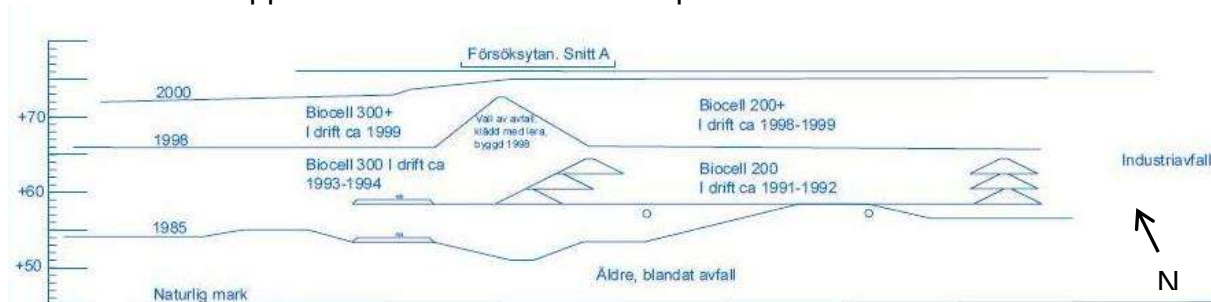
För att beskriva det i Steg 3 undersökta området delas det lämpligen in i tre delområden vilka i figur 2.9 benämns från A till C. Den naturliga markytan är i stort sett densamma under alla tre områdena A, B och C och ligger ca +45 meter över havet. Därpå är det utfyllt med blandat avfall till en höjd om ca +57 meter fram till 1985. På en höjd mellan ca +57 och ca +67 meter delas området av ett system av vallar längs en sydväst-nordöstlig axel. På västra sidan om denna delning är hushållsavfall deponerat med biocellsteknik och på östra sidan om vallarna är verksamhetsavfall och grovavfall deponerat.



Ovanför denna nivå på ca +70 meter är det inom delområde A deponerat ca 5-10 meter hushållsavfall under slutet av 1990-talet och därefter är detta delområde försett med en sluttäckning som ska hindra vatten från att tränga ner i det deponerade avfallet. Inom delområde B har industriavfall deponerats så sent som 2008 och ovanpå detta avfall finns endast en mellantäckning i väntan på sluttäckning. Delområde C utgörs ovan nivån +72 meter av omdeponerat äldre hushållsavfall som är täckt med kompostmaterial i väntan på sluttäckning.

I takt med att Filbornadeponin växte under 1960- och 1970-talet kulverterades Väla bäck som ursprungligen rann genom området. Senare leddes bäcken om längs en ny sträckning runt om deponin. Längs den ursprungliga sträckningen återfinns dock ett stråk av grova postglaciala sediment i de naturliga jordlagren och det är mycket sannolikt att dessa grova material leder lakvatten i en nordvästlig riktning ut från deponin.

I figur 3.24 visas en vertikal profil genom det ljusgrå snitt som är markerat genom det detaljerade undersökningsområdet i figur 2.14 (kapitel 2). Den naturliga markytan överlagras av äldre, blandat avfall. Över detta finns ett antal bioceller som varit i drift under början av 90-talet. Utmärkande strukturer är den stora vall som löper mellan biocellerna och längs med försöksytan. Denna vall är byggd av avfall och klädd med tunna skikt av lera och slamkompost. Det finns en mellantäckning av leriga schaktmassor på nivån +65 meter, mellan biocellerna 200 - 300 och 200+ - 300+. Strax väster om vällen har det tidigare gått en stor väg som markerats på två nivåer i figur 3.20; +54 och +59 meter. De heldragna strecken i figur 3.24 motsvarar uppmätta marknivåer under respektive år.



Figur 3.24. Profilsnitt över de inre strukturerna i deponin motsvarande det ljusgrå snittet i figur 2.14.

I figur 3.25 visas ett foto på vällen, fotograferat från sydväst mot nordost strax intill den detaljerade försöksytan under byggnationen av biocell 300+.

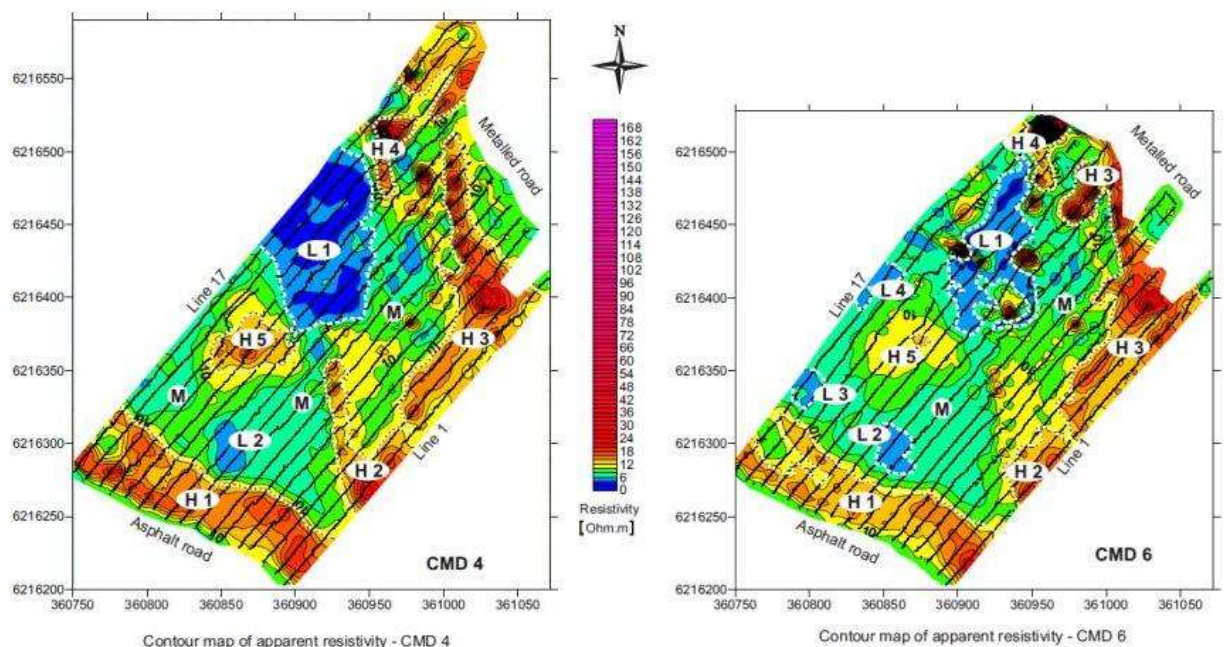




Figur 3.25. Fotografi av vallen i figur 3.20 taget under byggnationen av biocell 300+.

Stångslingram

I figur 3.26 nedan visas resultaten av konduktivitetsmätningarna med stångslingram, presenterat som skenbar resistivitet. Bilden till vänster visar mätningarna med CMD 4 som har ett djupomfång på 3 meter, medan bilden till höger representerar det större djupomfång på 4,5 meter som erhålls med CMD 6. Mätlinjerna framgår som svarta linjer i bilderna. Generellt sett är resistiviteten låg i området och överstiger sällan 20-25Ωm. De anomalier som markerats med bokstäverna L, M och H är tolkningar som står för låg, medium respektive hög resistivitet.

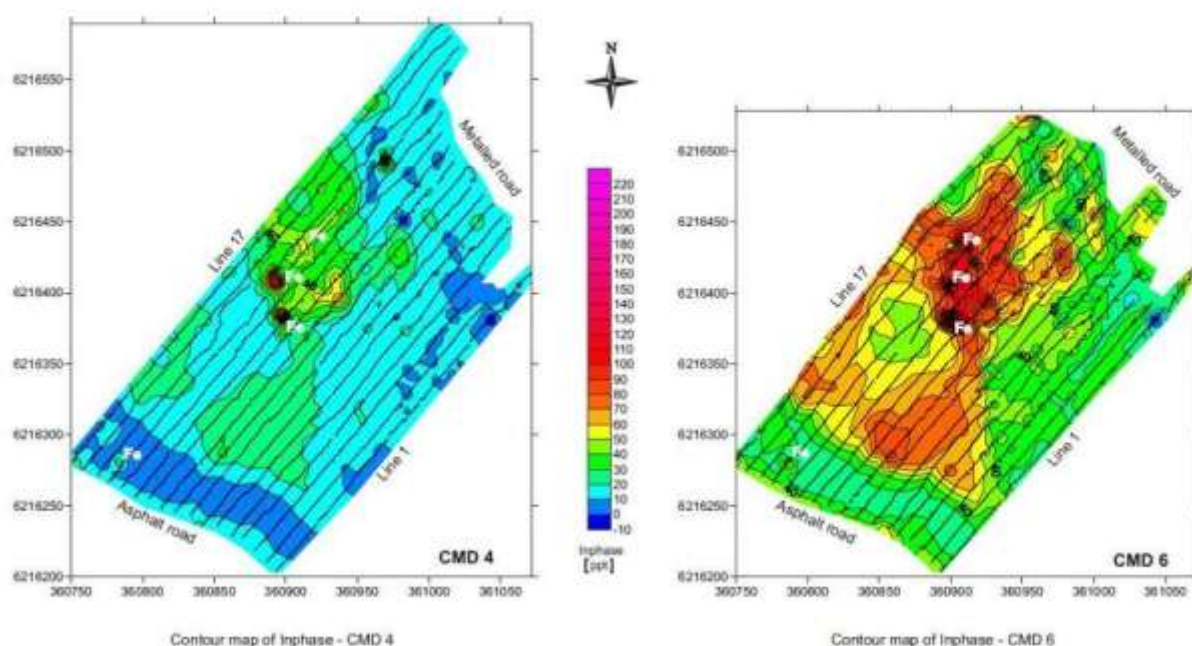


Figur 3.26. Resistivitet från mätningarna med stångslingram. Vänster: Djup 0-3m. Höger: Djup 0-4.5m



Väldigt låg resistivitet syns i de områden som markerats med L1-L4 i figur 3.26. Anomali L1 minskar med djupet, vilket tolkas som att mer konduktiva material finns närmare markytan. Anomalierna L3 och L4 syns endast på något större djup med CMD 6. Anomalier med hög resistivitet, H1-H5, är främst belägna i marginalerna av undersökningsområdet. Med undantag av H3 och H4 minskar resistiviteten på större djup. För övrigt dominerar området av medelhög resistivitet, M, som här definieras som storleksordningen $10 \Omega\text{m}$.

I figur 3.27 visas resultaten av in-phase mätningarna med CMD 4 till vänster och CMD 6 till höger.



Figur 3.27. In-phase från mätningarna med stångslingram. Vänster: Djup 0-3m. Höger: Djup 0-4.5m

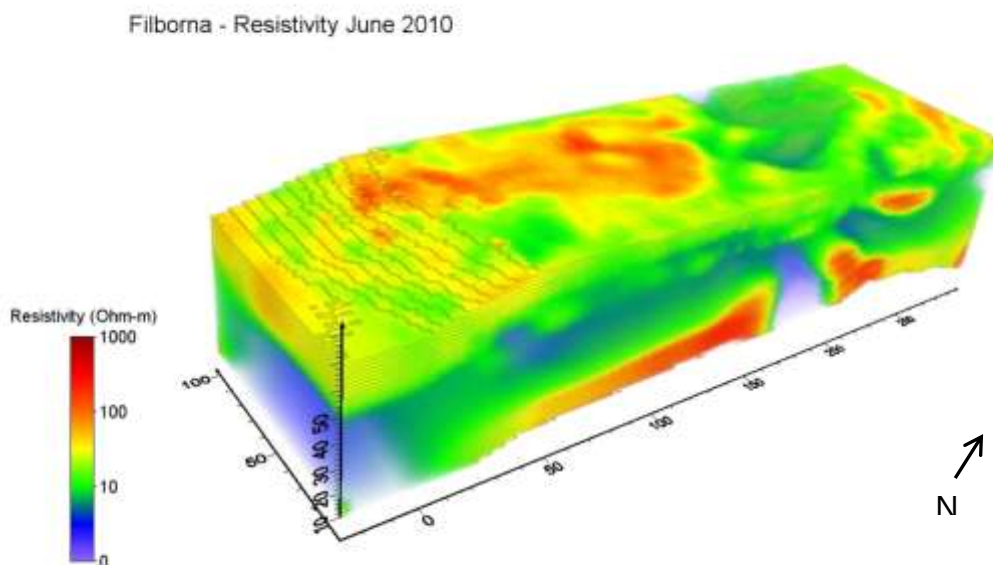
I konturkartorna av in-phase framgår tre synliga objekt som markerats med "Fe". Dessa små lokala anomalier är belägna kring tre metallobjekt synliga vid markytan. Magnetisk susceptibilitet är en materialegenskap som beskriver hur magnetiskt ett material blir i närvaro av ett externt magnetiskt fält. Därför är det inte ett oväntat resultat att metallobjekten ger stora utslag. De i övrigt generellt höga in-phase värdena i resten av området orsakas snarare av den väldigt låga resistiviteten än av massiv förekomst av metallobjekt på större djup (eftersom hög konduktivitet i form av sekundärfältets out-of-phase-komponent åtföljs av en hög in-phase-komponent).

Storskalig resistivitet och IP

En 3D-volym över resistivitetsdistributionen i undersökningsområdet (linje 7-17) visas i figur 3.28 med en logaritmisk färgskala. Resistiviteten är generellt sett låg i området (storleksordningen $5\text{-}20 \Omega\text{m}$ motsvarar gröna och gula områden), med undantag av vissa zoner främst vid markytan där resistiviteten uppgår till storleksordningen $100\Omega\text{m}$ och i vissa fall överstiger $250\Omega\text{m}$. I botten av 3D-volymen syns



ett högresistivt lager som kan tolkas som den sedimentära berggrunden av främst sandsten i området. Ca 200 meter nordost från asfaltsvägen som begränsar undersökningsområdet i sydväst syns en kraftig lågresistiv anomali mitt i den annars homogena högresistiva zonen. Denna anomali tolkades som den tidigare sträckningen av Väla bäck bestående av grova postglaciala sediment med hög genomsläpplighet av vatten (eventuellt elektriskt ledande lakvatten från deponin). Den undre delen av avfallsmaterialet har en resistivitet på mindre än 10 Ωm , varefter resistiviteten ökar mot markytan vilket stämmer väl överens med den förväntade grundvattennivån. En zon med låg resistivitet är synlig vid markytan vid ca $x=200\text{m}$, vilken motsvarar ett område utan täcklager på markytan.

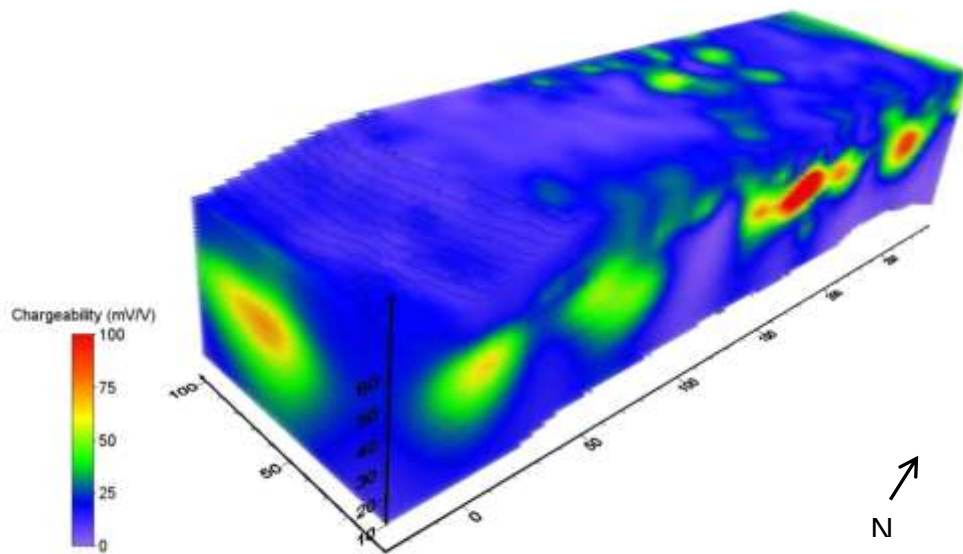


Figur 3.28. Resultat av storskaliga resistivitetsmätningar.

I figur 3.29 visas IP för samma område med en linjär färgskala. Anomalier med förhöjd IP syns tydligt, i synnerhet två med särskilt höga IP-värden, medan de flesta områden i 3D-modellen har låg IP. Vid markytan är IP-effekterna särskilt små, med undantag av området utan täcklager där något förhöjda IP-effekter jämfört med resten av markytan syns.

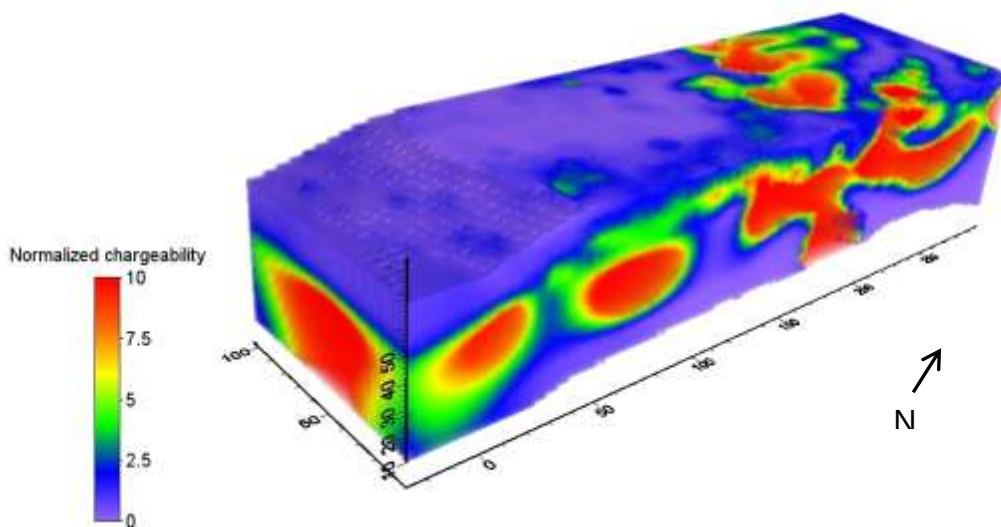


Filborna - Chargeability June 2010



Figur 3.29. Resultat av storskaliga IP-mätningar.

Filborna - Normalized chargeability June 2010



Figur 3.30. Normaliserad IP från de storskaliga resistivitets- och IP-mätningarna.

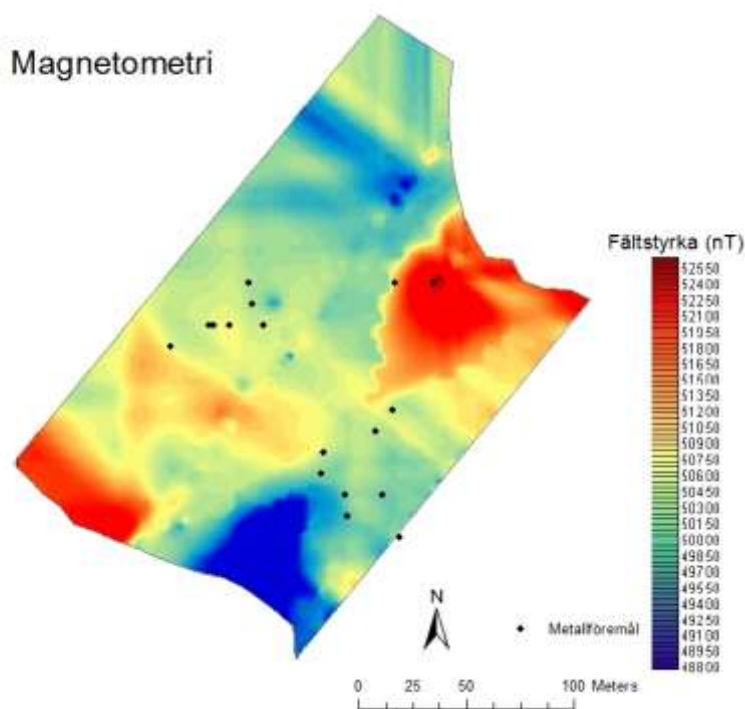
IP kan också illustreras som normaliserad IP, så som i figur 3.30. Mönstret liknar det i figur 3.29, men strukturerna framträder tydligare. Vid markytan är normaliserad IP generellt sett låg i det område där sluttäckningen finns, medan de nordöstligaste delarna visar på relativt starka anomalier i området som saknar sluttäckning. Under markytan framträder flera oregelbundet placerade anomalier med hög normaliserad IP. Vid en jämförelse mellan figur 3.28 och 3.30 kan man se att den lågresistiva anomalin kring $y=200\text{m}$ motsvaras av en anomali med hög norma-



liserad IP, medan det högresistiva lager som tolkas som berggrund i övrigt ger små normaliserade IP-effekter.

Magnetometri

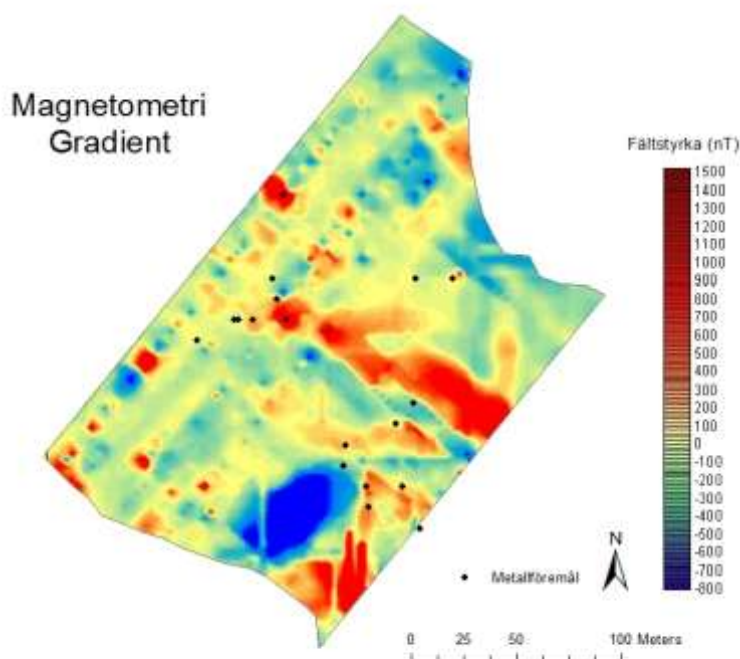
Resultaten av magnetometrimätningarna visas i figur 3.31 och 3.32. De svarta markörerna representerar metallobjekt som syntes vid markytan, så som metallstänger och skrot. Som det påpekades i kapitel 2 är resultaten osäkra, p.g.a. interpolationen av koordinatvärden för datapunkterna som ligger till grund för figurerna. Värdena har inte korrelerats mot basstation, men variationerna i det uppmätta totalfältet är mycket större än dygnsvariationen man kan förvänta sig mellan de två mättillfällena.



Figur 3.31. Magnetometri, totalfält.

Framförallt tre anomalier sticker ut, varav två har högre magnetisk fältstyrka än den generella fältstyrkan i området och den tredje har lägre fältstyrka. Den nordligaste av dessa tre anomalier är troligen relaterad till den ansamling metallstänger som påträffades i anomalins mitt. Den höga och låga anomalin i sydvästra delen av området befinner sig på var sin sida av den SV-NÖ gräns som skiljer hushållsavfall från verksamhetsavfall (jämför med figur 2.14 i kapitel 2). Den högre fältstyrkan påträffas i området där hushållsavfall deponerats. Enligt uppgift har mindre magnetiska föremål separerats från avfallet med en magnet som inte klarar att lyfta bort eventuella större föremål innan det deponerats. Verksamhetsavfallet grovsorterades först, varefter det krossades och magnetiskt material togs bort med en magnet. Även om det är svårt att bedöma i vilken av avfallstyperna mest metall finns kan resultaten eventuellt tolkas som att den låga magnetiska fältstyrkan i verksamhetsavfallet beror på att nästan all metall sorterats ut här, medan det i hushållsavfallet kan finnas metall kvar.



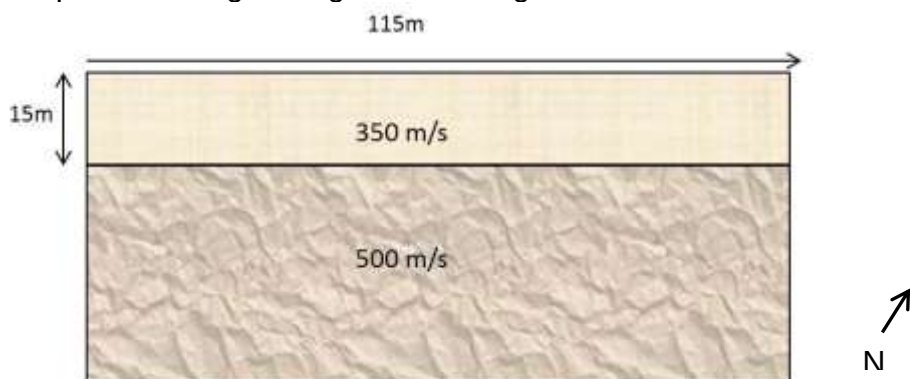


Figur 3.32. Magnetometri, gradient.

I figur 3.32 visas den magnetiska gradienten, som beräknas som skillnaden mellan värdena från de två horisontella sensorerna på magnetometern. Den beräknade gradienten förstärker yttre anomalier samt reducerar påverkan från dygnsvariationer i det magnetiska totalfältet, eftersom totalfältets påverkan subtraheras bort. Bilden skiljer sig onekligen mot totalfältet, vilket troligtvis indikerar att huvuddelen av anomalierna i figur 3.31 härrör från magnetiska variationer i de översta skikten, d.v.s. täckskiktet.

Refraktionsseismik

Resultaten av refraktionsseismiken indikerar en tvålagerföljd med ett övre ca 15 meter tjockt lager. I det övre lagret beräknades P-vågshastigheten till ca 350 m/s, och i det undre ca 500 m/s. En principskiss över stratigrafin med avseende på kompressionsvågshastighet visas i figur 3.33.



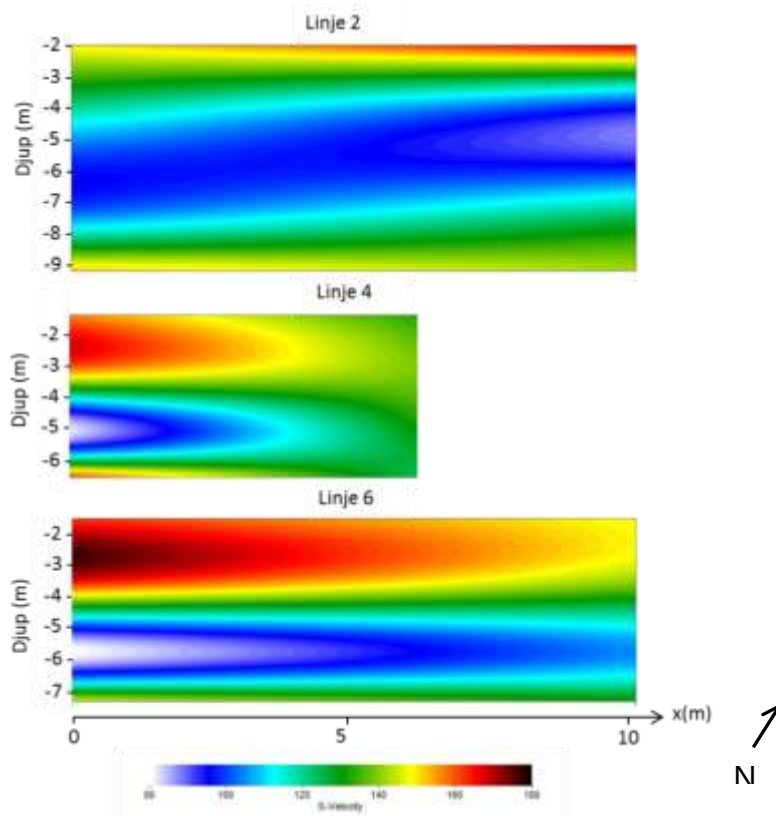
Figur 3.33. Skiss över resultaten från refraktionsseismiksmätningarna, som visar kompressionsvågshastigheten i en tvålagerföljd.



Kompressionvågshastigheten i jordlager ovan grundvattenytan ligger generellt inom intervallet 300-1000m/s. 350m/s är ett väldigt lågt värde och indikerar att materialet är poröst. Den högre hastigheten i det underliggande lagret kan eventuellt tolkas som att materialet har högre vattenhalt på större djup. Vid en jämförelse med de storskaliga resistivitetsmätningarna (figur 3.28) kan man se att djupet på det övre lagret stämmer ganska väl överens med den nivå där resistivitetsvärdena minskar, d.v.s. den förväntade grundvattennivån.

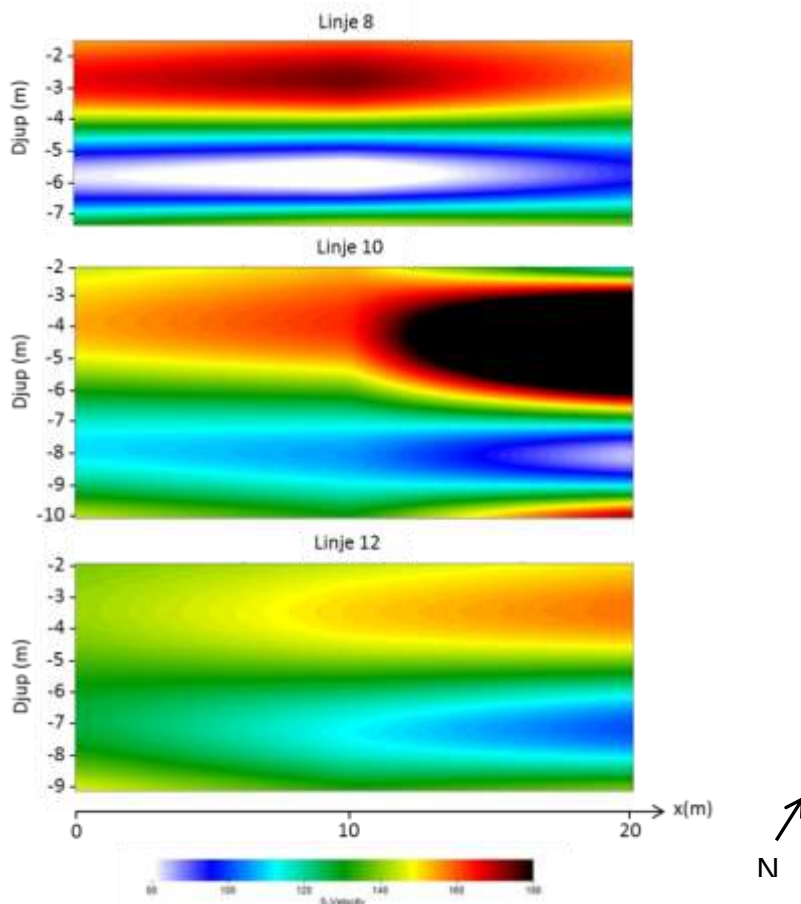
Ytvågsseismik

De inverterade resultaten från de sex ytvågsseismiska mätlinjerna visas i figur 3.34 och 3.35 nedan.



Figur 3.34. Resultat av ytvågsseismik (MASW), linjerna 2, 4 och 6.





Figur 3.35. Resultat av ytvågsseismik (MASW), linjerna 8, 10 och 12.

I samtliga profiler är skjuvvågshastigheten större i de översta 3-5 meterna av marken, för att sedan minska i den nedre delen av profilen. På ett djup mellan 7 och 9 meter under markytan syns indikationer på att skjuvvågshastigheten ökar igen. Det finns dock osäkerheter i resultaten som hör ihop med inversionen, eftersom flera olika slags modeller kan matchas till samma data. Dessutom är profilerna i figur 3.34 och 3.35 interpolerade från ett sparsamt antal inverterade datapunkter (4 st. datapunkter i Linje 4, 6 st. i Linje 2 och 6 respektive 11 st. i Linje 8, 10 och 12). Av dessa anledningar är det lämpligast att endast tolka väldigt storskaliga drag i profilerna, d.v.s. att den seismiska skjuvvågshastigheten minskar någonstans i mitten på varje profil.

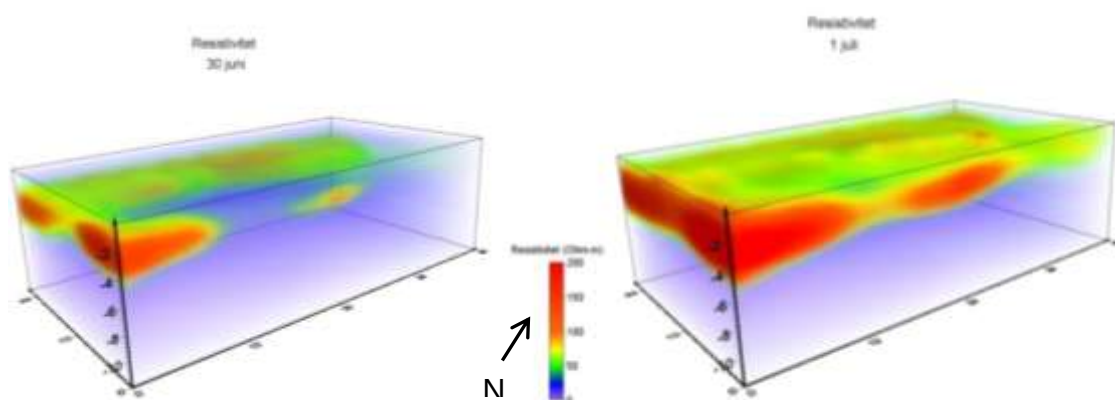
En tänkbar tolkning är att det undre lagret med lägre skjuvvågshastighet motsvarar avfallslagret, medan det överliggande lagret representerar sluttäckningen.

Detaljerad resistivitet och IP

I figur 3.36 visas resistivitetmodeller från de detaljerade mätningarna vid 09.00 den 30 juni (vänster) respektive 1 juli (höger). Generellt sett är resistivitetsdistributionen relativt konstant genom hela datasekvensen mellan den 30 juni till den 11 juli och liknar modellen till vänster i figur 3.36. Man kan urskilja några stråk av förhöjd resistivitet men i övrigt är marken ganska lågresistiv (under $40\Omega\text{m}$). Undantagen finner man i resultaten från den 1 juli samt den 9-10 juli då marken är generellt mer högresistiv i lagren nära markytan, så som i den högra modellen i figur 3.36. Det övre mer högresistiva lagret (ner till ca 4 meter under markytan) motsvarar

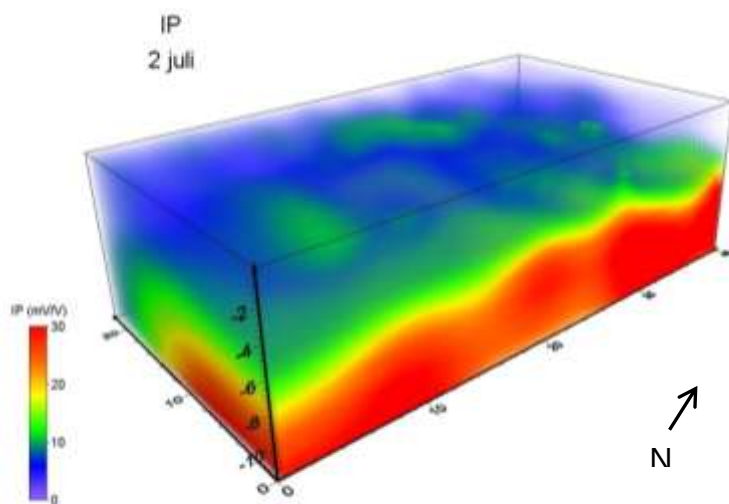


sannolikt sluttäckningen i området, medan det mycket lågresistiva underliggande lagret bör motsvara bioceller (jämför med profilskissen i figur 3.24) alternativt grundvattenytan.



Figur 3.36. Resultat från de detaljerade resistivetsmätningarna. Vänster: 30 juni 2011. Höger: 1 juli 2011.

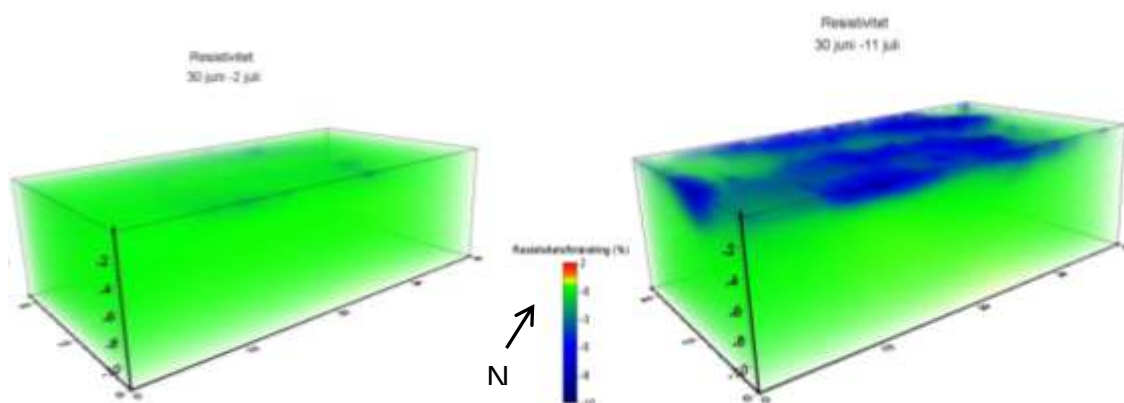
En IP-modell från den 2 juli visas i figur 3.37, där höga IP-effekter syns under ca 4-5 meters djup under markytan. Troligen har de större IP-effekterna på djupet med närvaro av avfallsmaterial att göra, medan täcklagret ger små IP-effekter.



Figur 3.37. IP-data från den 2 juni 2011.

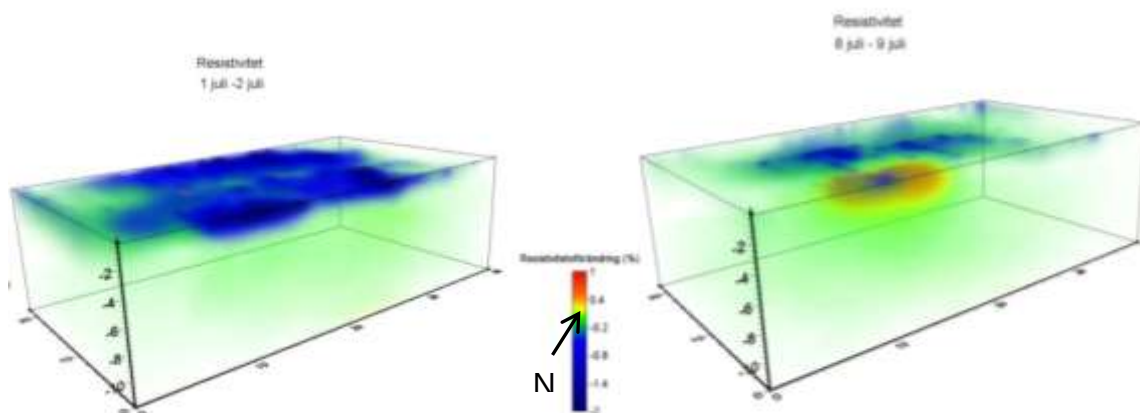
Med time-lapse mätningar kan man som tidigare visats även visualisera data från olika tidpunkter som differenser relativt resistivetsmodellen i början av mätperioden. På det sättet kan man illustrera vilken förändring i resistivitet som skett från början av mätperioden till en given tidpunkt. Figur 3.38 nedan visar den procentuella förändringen i resistivitet den 2 juli (vänster) respektive 11 juli (höger) relativt den första resistivetsmodellen som mättes den 30 juni. Mönstret under mätperioden är att resistiviteten nära markytan sjunker stadigt; i början långsamt och knappt synbart för att den 11 juli ha sjunkit betydligt jämfört med den 30 juni.





Figur 3.38. Förändring i resistivitet jämfört med den 30 juni 2011. Vänster: 2 juli 2011. Höger: 11 juli 2011 (time-lapse).

En annan variant är att visualisera mätdata är att jämföra en resistivitetsmodell med den föregående, för att se vilka förändringar som sker mellan två mättillfällen, vilket här är en period på 3 timmar. I figur 3.39 visas förändringen i resistivitet mellan 1 juli och 2 juli (vänster) respektive 8 juli och 9 juli (höger). Observera att färgskalan skiljer sig från figur 3.38 ovan; förändringarna är alltså mindre i dessa bilder. Mellan 1 och 2 juli syns en minskning i resistivitet; ett mönster som liknar det i figur 3.38. Till skillnad från i figur 3.38 kan man med visualiseringstekniken nedan dock även se en liten ökning i resistivitet i lagren under markytan under mätperiodens senare del mellan den 8 och 9 juli.

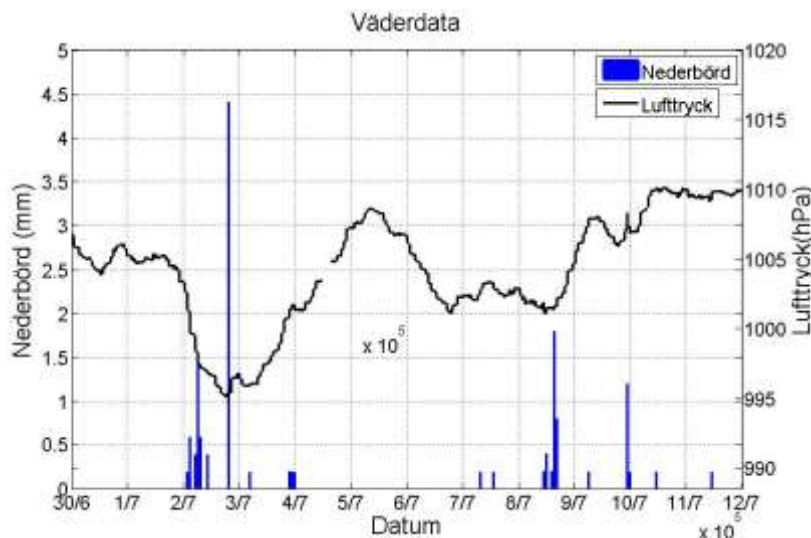


Figur 3.39. Förändring i resistivitet jämfört föregående tidssteg. Vänster: Förändringen mellan 1 och 2 juli 2011. Höger: Förändringen mellan 8 och 9 juli 2011.

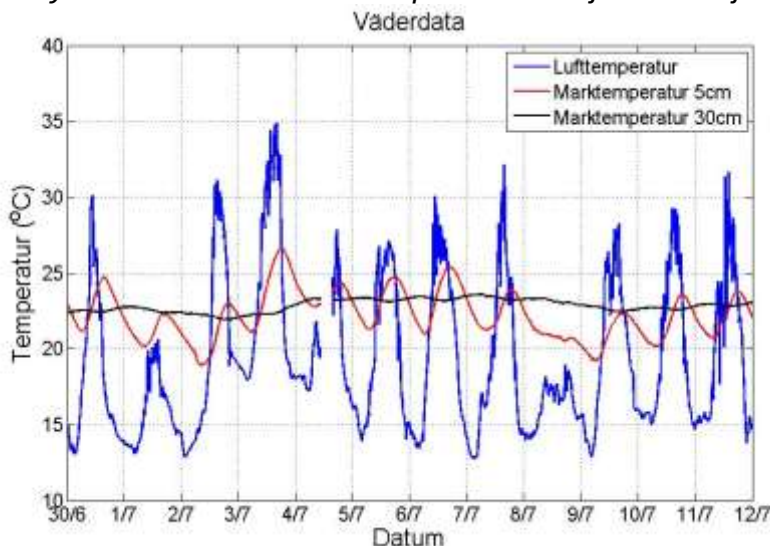
Förändringarna i resistivitet är generellt mycket mindre här jämfört med i Steg 2. Troligen finns det flera orsaker till detta, bl.a. att marken är torrare under sommarmätningarna i Steg 3 jämfört med vintermätningarna i Steg 2. En annan möjlighet är att gastrycket är lägre i denna del av deponin jämfört med området för Steg 2 – mätningarna. Inversionen av resistivitetsdata spelar dock också roll för de mer stabila variationerna i Steg 3. Data från alla tidssteg i Steg 3 inverterades tillsammans, med en begränsning som minimerar skillnaderna mellan modellerna i tid. I Steg 2 inverterades däremot varje dataset var för sig. I samband med de detaljerade mätningarna av resistivitet samlades även väderdata in. I figur 3.40 visas lufttrycket och nederbörden under mätperioden, och i



figur 3.41 visas lufttemperaturen tillsammans med marktemperatur från två olika djup.



Figur 3.40. Lufttryck och nederbörd under perioden 30 juni till 11 juli.



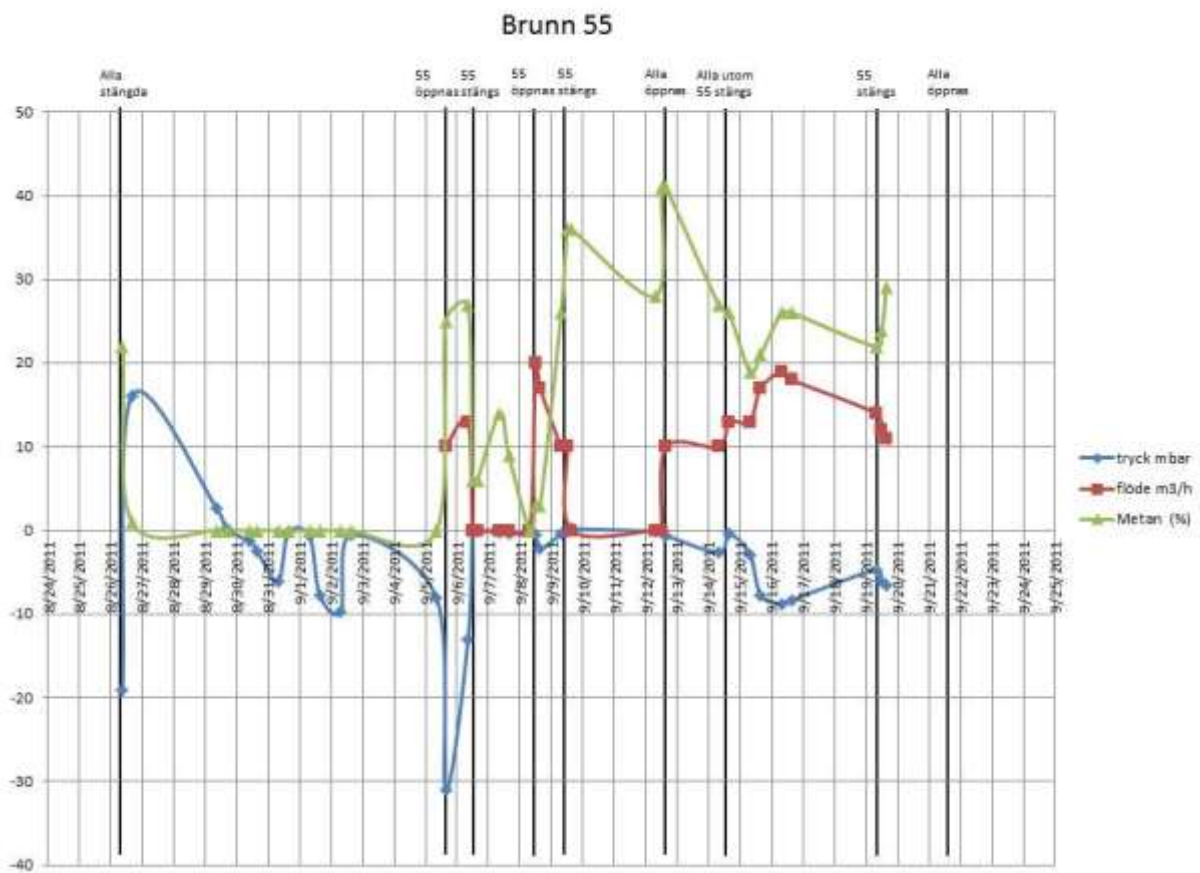
Figur 3.41. Lufttemperatur och marktemperatur på två djup under perioden 30 juni till 11 juli.

3.4 Steg 4 - Utveckling av metodik på referensdeponier

Mätningar på Albäcksdeponin, Trelleborg (SYSÄV)

Mätningarna på Albäcksdeponin pågick i drygt 20 dygn, då en resistivetsmodell genererades var tredje timme. Samtidigt utfördes test med på- och avslagning av gasbrunnar i närområdet, i syfte att undersöka hur regleringen av gasflödena påverkade resistiviteten i markvolymen. I första hand manipulerades brunn U55, vilken var belägen närmast undersökningsområdet. I figur 3.42 visas tryck, flöde och metanhalt från brunnen, vilket registrerades under försöksperioden. Även tidpunkterna för på- och avslagning av de olika brunnarna har markerats i figur 3.42.

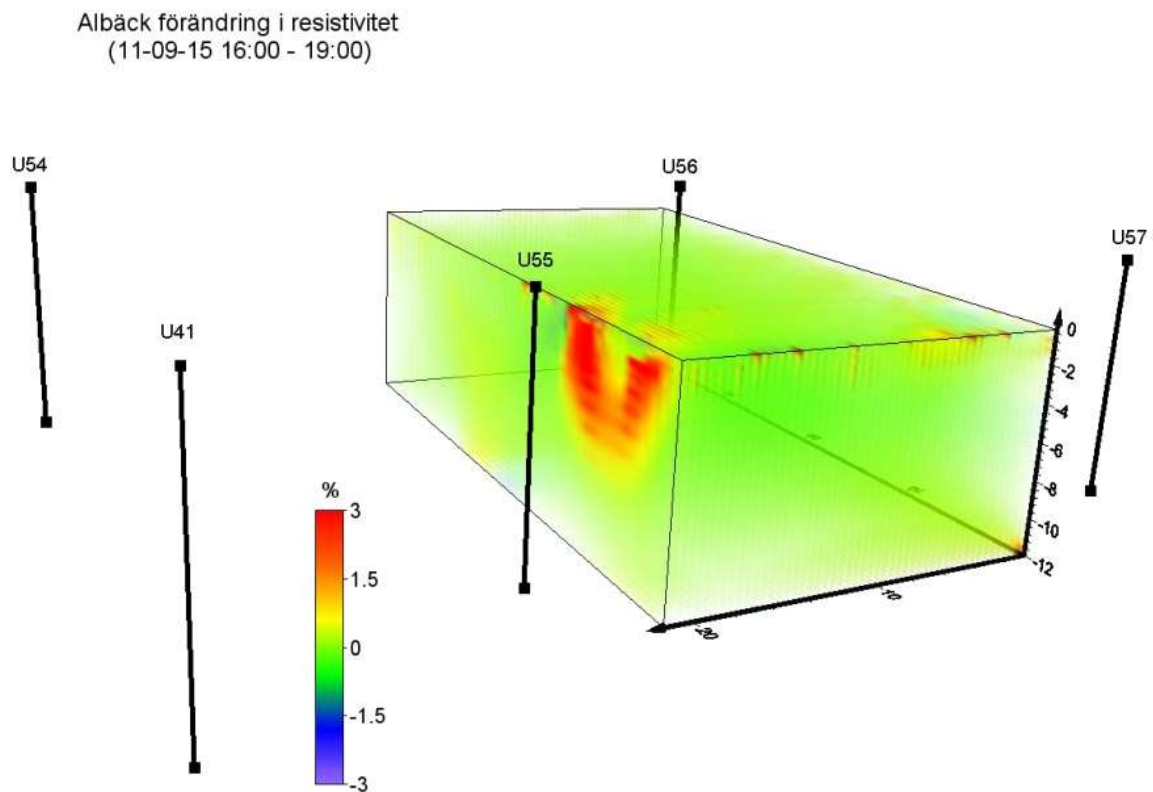




Figur 3.42. Tryck, flöde och metan registrerat i brunn U55. På- och avslagningsstillfällena av brunnarna vid undersökningsområdet är markerade med lodräta streck.

Resistivitetsmodellerna studerades systematiskt genom att varje mätning jämfördes med den tidigare, vilket resulterade i procentuell förändring i resistivitet mellan två olika mättillfällen. Figur 3.43 visar förändringen i resistivitet den 15 september mellan 16:00 och 19:00, tillsammans med lägena för de olika gasbrunnarna i området. Mätningarna är gjorda strax efter alla brunnar utom brunn U55 stängts av (jämför med figur 3.42). Man kan i figur 3.43 se att resistiviteten ökar i närheten av brunn U55, vilket tolkas som att gasinnehållet i marken nära brunnen ökar p.g.a. undertrycket som skapas av brunn U55. En ökning i resistivitet vid brunn U55 motsvarande ett uttag av gas från brunnen sågs upprepade gånger under mätperioden.

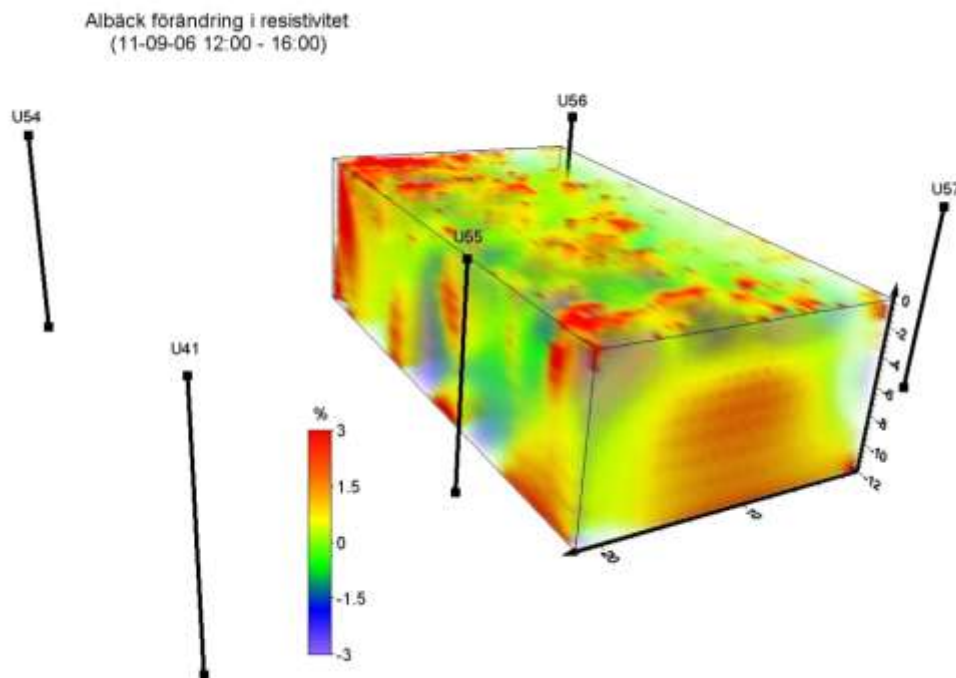




Figur 3.43. Procentuell förändring i resistivitet mellan 16:00 till 19:00 den 15 september. En ökning i resistivitet syns vid brunn U55.

Ett annat mönster som upptäcktes visas i figur 3.44, där förändringen i resistivitet den 6 september mellan 12:00 till 16:00 visas. Före mätningen hade alla gasbrunnar i området varit avstängda under en längre period. Strax innan mätningarna i figur 3.44 öppnades brunn U55 och stängdes igen ett knappt dygn senare. Under de tre närmsta timmarna efter brunn U55 har stängts ökar resistiviteten kraftigt i hela volymen.



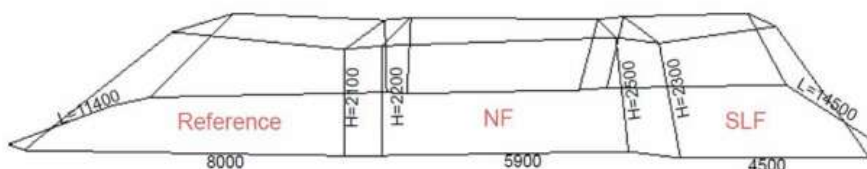


Figur 3.44. Procentuell förändring i resistivitet mellan 12:00 till 16:00 den 6 september. En generell ökning i resistivitet syns i hela mätvolymen.

Tolkningen av resistivitetsförändringarna är att brunn U55 suger till sig mer gas till mätvolymen då den öppnas den 5 september kl. 16:00. Troligen transporteras mer gas till volymen än gasbrunnen hinner samla upp, vilket ger en generell ökning i resistivitet i marken. Strax efter att gasbrunnen stängs av den 6 september kl. 12:00 ökar resistiviteten som mest då gasen p.g.a. den tryckobalans som skapats i marken fortsätter att migrera till mätvolymen. Istället för att migrera till gasbrunnen stannar gasen dock i marken, vilket leder till att resistiviteten ökar relativt kraftigt.

Mätningar hos Stena Metall, Halmstad

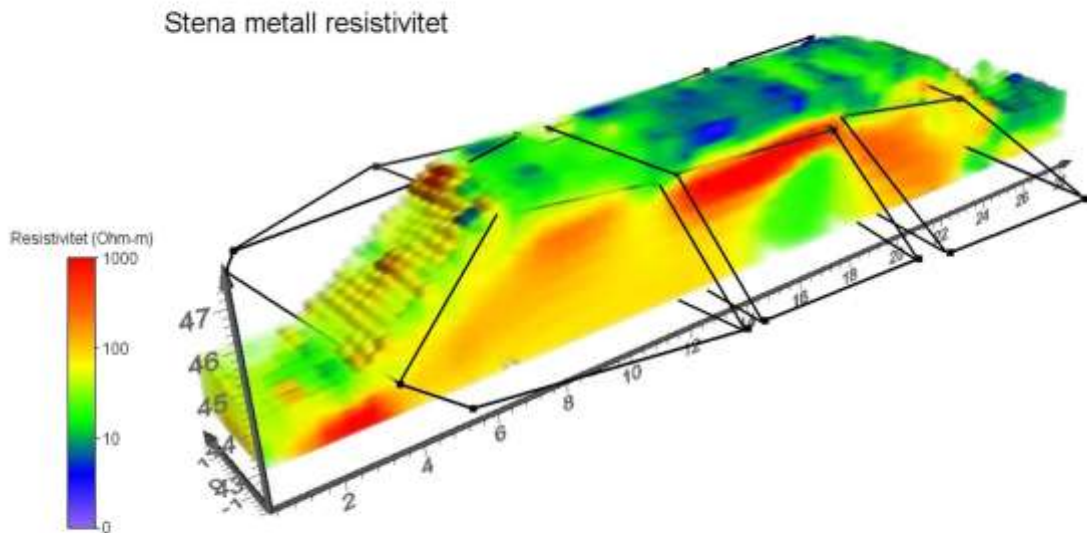
I figur 3.45 visas en bild över den inmätta högen, konstruerad av morän (referensmaterial) till vänster, Non-ferrous metal (NF) i mitten och Shreddar Light Fraction (SLF) till höger. Ovanpå dessa celler lades över hela högen ett cirka 0.5m tjockt lager av kompost (ej inritat i figur 3.45).



Figur 3.45. Skiss över den konstruerade hög med skilda avfallsceller som de geofysiska mätningarna utfördes på hos Stena Metall, Halmstad. Reference motsvarar morän, medan NF står för Non-ferrous metal och SLF står för Shreddar Light Fraction.

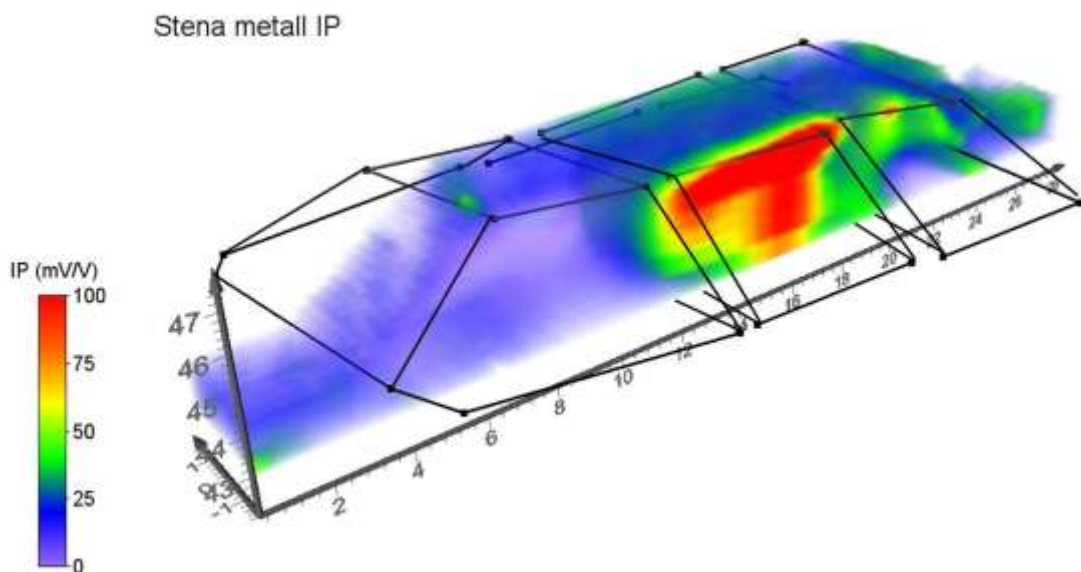


En 3D-modell över resistivitetsresultaten visas i figur 3.46. Resistiviteten följer från vänster till höger ett mönster med relativt hög resistivitet (hundratals Ωm), medelresistivitet (flera tiotals Ωm) och medelhög resistivitet. Dessa zoner överlagras av ett skikt med låg resistivitet (ned till under $10 \Omega\text{m}$) med mäktighet upp till ca 1,5 meter.



Figur 3.46. 3D-modell av resistivitet från mätningarna hos Stena Metall.

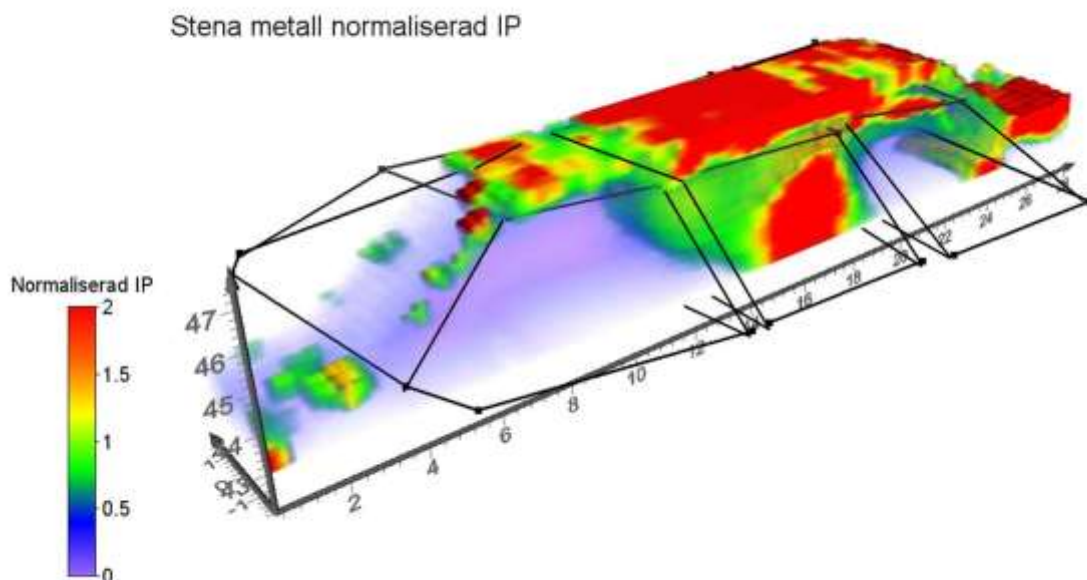
I figur 3.47 visas IP i en 3D-modell. Från vänster till höger syns en låg uppladdningsförmåga ($<10 \text{ mV/V}$), hög uppladdningsförmåga ($>100 \text{ mV/V}$) samt medelhög uppladdningsförmåga ($>40 \text{ mV/V}$). Det överlagrande lågresistiva skiktet har också en förhöjd uppladdningsförmåga ($10\text{--}40 \text{ mV/V}$).



Figur 3.47. 3D-modell av IP från mätningarna hos Stena Metall.



Resultaten i form av normaliserad IP-effekt uppvisar i princip samma mönster som IP-effekten, med undantag av att det översta lågresistiva skiktet genomgående har hög ledningsförmåga (>2 mS/m), se figur 3.48.



Figur 3.48. 3D-modell av normaliserad IP från mätningarna hos Stena Metall.

Sammanfattningsvis visar resultaten med resistivitet-IP tydliga skillnader mellan de olika materialen i högen, se Tabell 3.2. Resultaten tyder också på att täckskiktet bitvis är betydligt mäktigare än 0,5 meter som var avsikten, vilket med största sannolikhet beror på sättningar och/eller utglidning i sidled av det utlagda materialet. Resultaten visar att det genom att kombinera resistivitet och IP är möjligt att skilja de olika materialen i detta försök åt. Genom att utföra en 3D-undersökning skulle det således vara möjligt att uppskatta volymerna av de olika materialen.

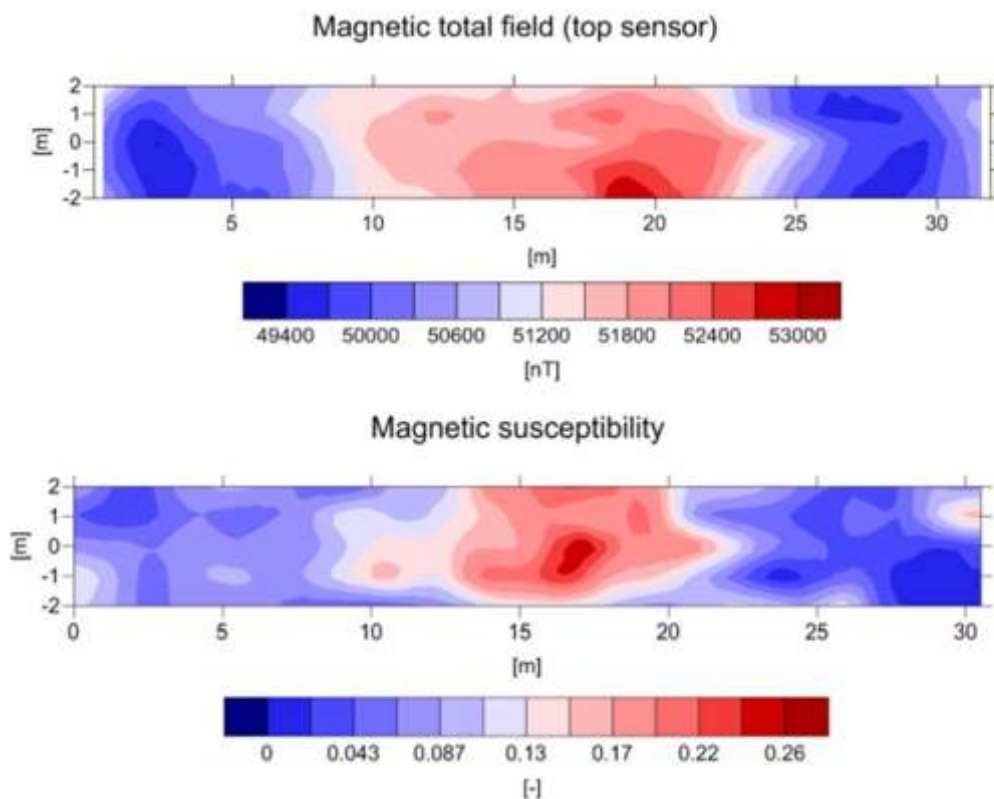
Tabell 3.2. Ungefärliga intervall för de geoelektriska egenskaperna för de olika materialen.

Material	Resistivitet (Ωm)	IP-effekt (mV/V)	Normaliserad IP-effekt (mS/S)
Morän	110-500	<10	$<0,2$
Non-ferrous material (NF)	33-110	>100	1-2
Shreddar-light fraction (SLF)	60-200	40-90	0,2-1,2
Kompost	5-45	0,2-0,8	$>0,2$

Resultaten från magnetometrimätningen respektive magnetisk susceptibilitet från stångslingramsundersökningen visas i plan i figur 3.49. Såväl det magnetiska



totalfältet som den magnetiska susceptibiliteten visar positiva avvikelser över NF, vilket torde betyda att det innehåller en hel del järn.



Figur 3.49. Magnetiskt fält (överst) och magnetisk susceptibilitet (underst) från mätningarna med magnetometri respektive stångslingram hos Stena Metall.



4. Diskussion

Inledningsvis i diskussionskapitlet görs en jämförelse mellan mätningar vid olika årstider, och en diskussion kring generella samband och iakttagelser (kap 4.1). I detta kapitel jämförs resultat från Fas 1 som tidigare redovisats i SGC-rapport 208 (Rosquist et al. 2009) med resultaten från Fas 2 – Steg 2, eftersom de signifikant skilda väderförhållandena (mellan sommaren 2008 och vintern 2009) gav resultat av olika karaktär även om mätningarna utfördes på samma försöksyta. I kapitel 4.2 sammanfattas nya indikationer på möjligheterna att använda resistivitet för att detektera gasrörelser baserat på de detaljerade mätningarna över tid i Fas 2 - Steg 2, och i kapitel 4.3 diskuteras en övergripande tolkning av gasrörelserna i deponin under mätningarna i Fas 2 – Steg 2. Metodiken som utvecklats för storskaliga mätningar med geofysik i Fas 2- Steg 3 diskuteras i kapitel 4.4. Slutligen diskuteras resultat från de detaljerade mätningarna i Fas 2 – Steg 3 i kapitel 4.5, där erfarenheter från Fas 1 och Fas 2 – Steg 2 har använts som tolkningsunderlag.

4.1 Allmänt om skillnader i data från mätningar på sommaren 2008 (Fas 1) och vintern 2009 (Fas 2).

Vid en jämförelse av mätningar på exakt samma fältlokal vid två olika tillfällen, sommaren 2008 och vintern 2009 kan vissa intressanta jämförelser konstateras. På grund av högre konduktivitet i marken under vintern 2009 jämfört med sommaren 2008 är djupnedträngningen på resistivitetsmätningarna mindre. De ytliga strukturerna är tydligast. Kompostvallen som syntes tydligt 2008 är inte lika tydlig 2009 då man visualiserar resistivitetsdistributionen. Dock syns indikationer på kompostvallen när olika dataset jämförs över tid. Variationerna över tid är troligen starkt kopplade till:

- frysning av marken (ökad resistivitet)
- regn och infiltration av vatten i marken (minskad resistivitet)
- gasinnehåll i marken (ökad resistivitet)

Deponins heterogena struktur med bl.a. varierande tjocklek på täcklagret, varierande ler- och metallhalt i marken och varierande porositet spelar roll för var i volymen förändringar syns. Generellt kan man anta att gas och vatten i stort sett rör sig i samma interna strukturer som karakteriseras av hög genomsläpplighet (permeabilitet).

Detaljeringsgraden i resistivitetsmodellerna beror på avvägningar då man väljer mätuppställning (kortare elektroavstånd ger högre detaljrikedom i ytan men medför mindre djupnedträngning) och på kontrasten i elektriska egenskaper mellan strukturerna (större kontrast gör att man kan upptäcka mindre strukturer och vice versa). Mindre heterogeniteter blir därför "utjämnade" i modellen, och kommer således inte att synas. Man kan kvantifiera upplösningsförmågan genom att simulera olika strukturer med numerisk modellering.

Mätningarna 2008 och 2009 är utförda på samma sätt, men inversionen av data skiljer sig åt. Medan data från 2008 är inverterad i ett rutnät där cellerna är 0.5x1.0m stora, har 2009 års data inverterats i rutnätet 0.5mx0.5m. Även djupskalorna skiljer sig åt; modellerna från 2008 har en utsträckning på totalt 13.6 meter medan 2009 års modeller är 6.7 meter djupa. 2009 års data är alltså inverterad i ett finmaskigare rutnät både horisontellt och vertikalt. En annan utmärkande teknisk skillnad mellan Fas 1 och Fas 2 – Steg 2 var kvaliteten på data. Totalt 3888



datavärden samlades in per mätillfälle både under 2008 och 2009. Under sommaren 2008 hade alla dataset en konstant hög datakvalitet med mellan 3859-3888 användbara mätvärden. Datakvaliteten var under vissa perioder sämre under vintern 2009 (se figur 3.18).

Med avseende på resultaten av mätningarna var den största skillnaden mellan 2008 och 2009 årstiden; medan mätningarna utfördes under sommaren 2008 (relativt jämn temperatur och torr mark, med enstaka regn som medförde klara kontraster i markfuktighet) gjordes mätningarna under vintern 2009 under väldigt varierande väderförhållanden. Vid mätningarna på vintern 2009 var marken generellt mycket fuktig; i två hörn av undersökningsområdet stod vattenytan över marknivån under hela mätningen. Ytterligare regn skapade därför troligen inte så stora förändringar av fukthalten i marken (förhållandet gas/vatten i porerna) som under sommaren 2008, även om regnen detekterades tydligt i markfuktighetssensorerna (dessa var endast installerade i de översta 5 cm av markytan). Dessutom varierade temperaturen på ett till synes mer oregelbundet sätt under vintermätningarna (i alla fall under perioden från början av december), beroende på att den dygnsliga variationen var dold under mer markanta trender, som en kraftig minskning i temperatur i slutet av december. Fr.o.m. den 12 december sjönk temperaturen tidvis under nollstrecket, och under perioden strax därefter föll snö (15-17 dec) som efter ett par dagar totalt täckte undersökningsytan (den 17 december). Förutom detta var marken även frusen under perioden 1-3 dec (en period där resistivitetsdata dock saknas).

Den stora variationen i väder under vintermätningarna 2009 medförde en intressant möjlighet att studera omgivningens påverkan på resistivitmätningar och markprocesser i allmänhet. Dock innebar det samtidigt en stor svårighet, eftersom det var problematiskt att reda ut orsak och verkan då flera förhållanden ändrades samtidigt och ofta. Därmed har det varit svårare att hitta mönster i datan på det sätt som var möjligt under sommaren 2008.

En annan viktig aspekt är att dessa olika förhållanden i marken inte bara påverkar markprocesserna utan även själva resistivitmätningarna på olika sätt, i synnerhet frysning av marken. Det är tydligt att kvalitén på resistivitsdatan varierar betydligt mer 2009 än under 2008. En av konsekvenserna är att det varit nödvändigt att rensa ut en hel del data. En annan konsekvens är att de skilda förhållandena och den ojämna datakvaliteten kan medföra större osäkerheter då jämförelser mellan olika mätillfällen görs.

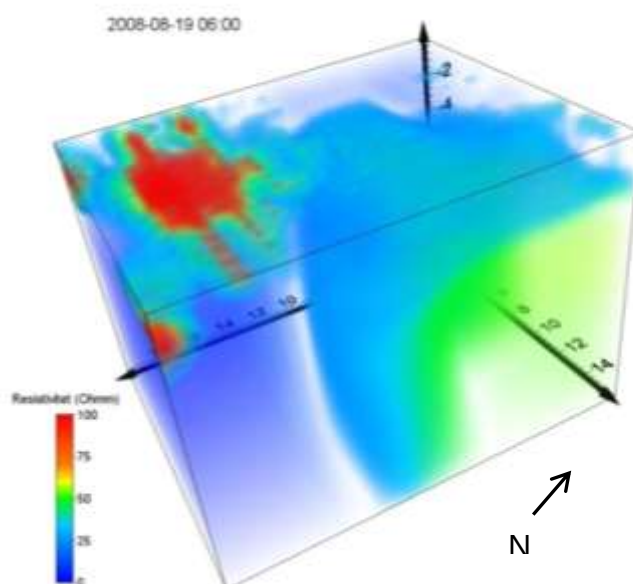
På samma sätt som i dataanalysen 2008 (sommarmätningarna) gjordes även temperaturkorrigering av resistivitskurvor för vintermätningarna (2009, se Johansson, S. et al 2011). Dock visade det sig att temperaturkorrigeringarna inte spelade så stor roll för vintermätningarna som för sommarmätningarna; de hjälpte inte till att hitta dolda trender på samma sätt utan ändrade bara datan marginellt. En anledning till detta kan vara att variationerna som syns i resistivitsdatan från vintermätningarna antingen har orsaker som är betydligt viktigare än de variationer som kan uppstå p.g.a. temperaturvariation. Eftersom marken var relativt fuktig och mer eller mindre nederbörd förekom frekvent är det troligt att dynamiken av vattnet i markporerna var konstant stor under mätperioden, till skillnad från 2008 då markporerna, på grund av låg fukthalt, var "tomma" innan en regnskur infiltrerade marken och fyllde porerna med vatten, en process som tydligt dominerade resistivitsvariationerna. En annan möjlig anledning är att de stora resistivitsvariation-

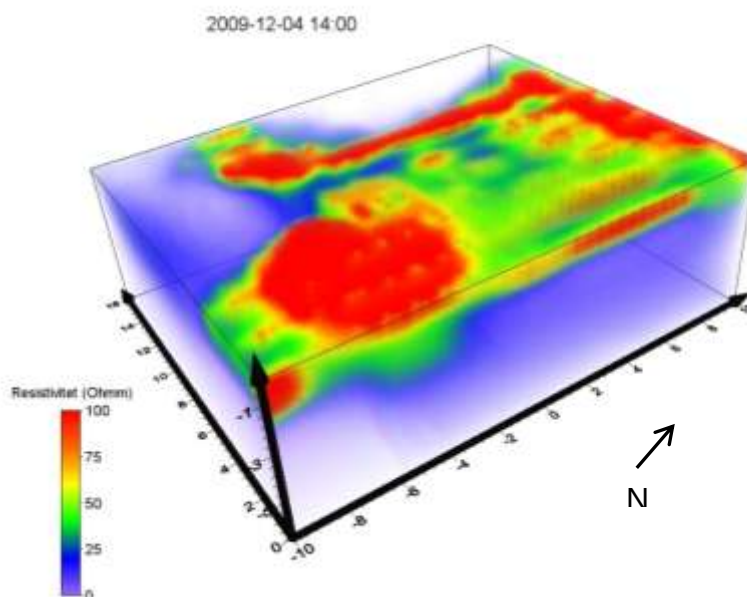


erna i vintermätningarna beror på artefakter som t.ex. varierande datakvalitet och markförhållanden och därför inte har något samband med temperatur i marken. En slutsats är att de variationer i resistivitet som sågs i 2008 års data var kraftigt dominerade av regn- och infiltrationsprocesser, som det också då föreslogs. Denna slags variationer är svåra att urskilja i 2009 års resistivitetsdata, troligen p.g.a. den generellt konstant höga markfuktigheten.

Ytterligare en slutsats är att variationerna i resistivitet över tid är större i 2009 års data jämfört med 2008. Även här kan markvattnet spela en viktig roll, men snarare genom konstant omdistribution av vattnet i stället för isolerade infiltrationsprocesser. De större variationerna i resistivitet kan också vara anledningen till att marktemperaturen får en mindre betydande roll för den totala variationen i resistivitet vintern (2009) jämfört med sommaren (2008).

I figur 4.1 visas en resistivitetsmodell från 2008 tillsammans med en från 2009, i syfte att jämföra de storskaliga strukturerna. Modellen från 2008 har roterats, eftersom koordinatsystemet var vänt på olika håll under 2008 och 2009. Kompostvallen syns i 2008 års mätningar som en högresistiv struktur i ytan som blir lågresistiv på djupet. Även i 2009 års modeller är kompostvallen synlig i nedre hörnet ($x=-8$ till -2 , $y=0$ till 8 m) som en högresistiv anomali som liksom tidigare mätning är lågresistiv på djupet. I 2009 års resistivitetsmodeller går det dock inte att urskilja begränsningarna på kompostvallen så som i 2008 års data. Detta beror troligen på att marken under vintersäsongen 2009 är så pass vattenmättad genom hela markvolymen att ett område med högre porositet inte skiljer ur sig från resten av marken med avseende på vattenhalt. Generellt sett är resistiviteten högre i de ytnära lagren 2009 jämfört med 2008. Eventuellt kan detta bero på att grundvattennytan är högre och markens omättade zon är mindre 2009, och att gastrycket därför blir högre i de ytnära lagren.



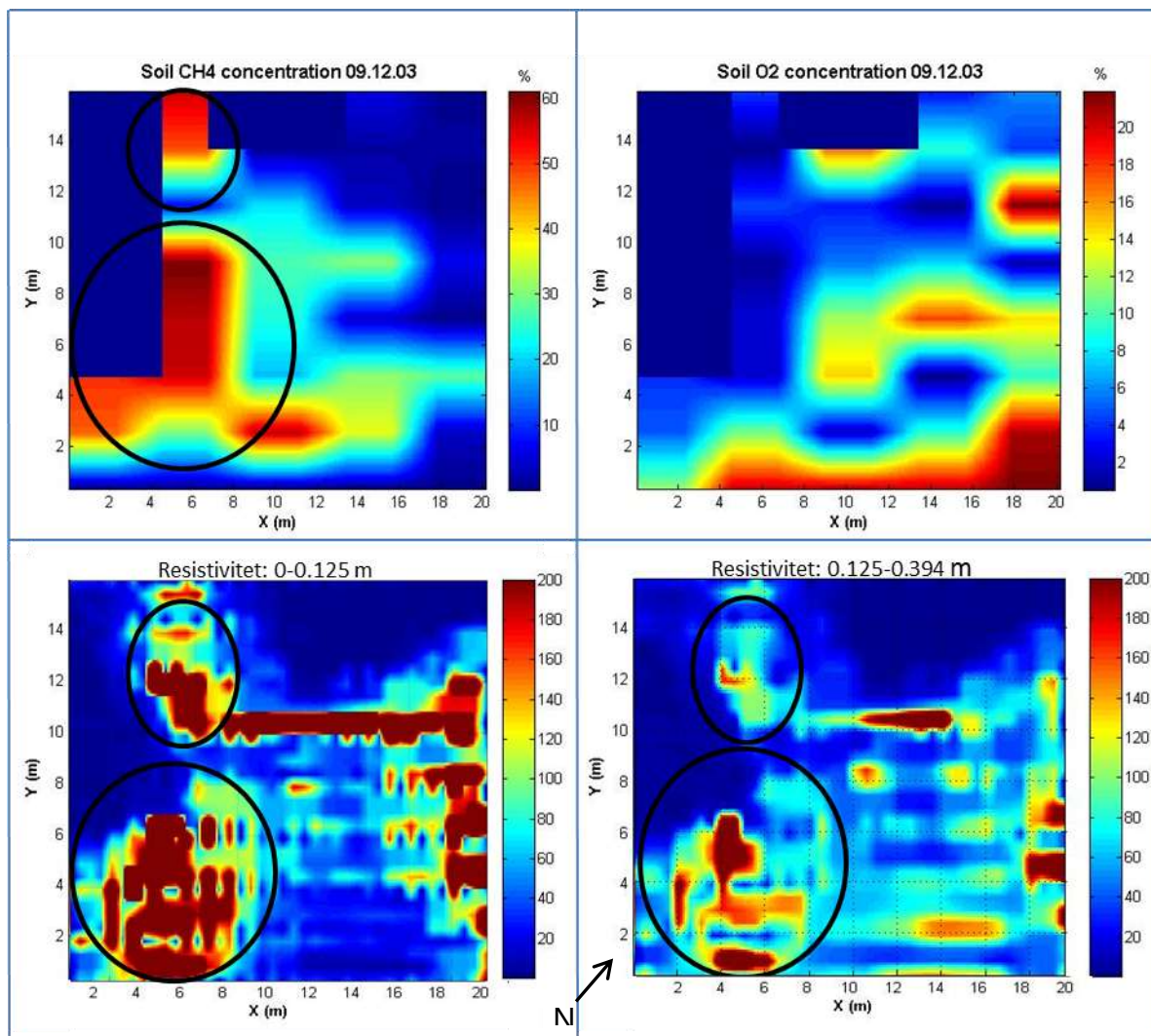


Figur 4.1. Resistivitetesmodeller från mätningarna sommaren 2008 (överst) och vintern 2009 (nederst). Generellt sett är resistiviteten högre i de ytnära lagren 2009 jämfört med 2008.

4.2 Nya indikationer på att man kan detektera gas med resistivitet – mer detaljerad mätning

De tydligaste resultaten i data från Steg 2 syns i de generella rumsliga skillnaderna i dataseten. Resultaten av Hamburgs universitets gaskoncentrationsmätningar 20cm under markytan från den 2-3 december ses i figur 3.13 i kapitel 3.2. I figur 4.2 nedan har de visualiserats som linjärt interpolerade bilder för att underlätta en jämförelse med resistivitetsdatan. Som väntat är metan- och syrekoncentrationerna i princip inverser av varandra. Tolkningen av detta är att markporerna står i direkt kontakt med atmosfären i de områden där syrekoncentrationen når atmosfäriska koncentrationer. Områden med hög metankoncentration och låg syrehalt motsvarar ansamlingar av deponigas. Koncentrationen har inget samband med gastryck. Dock är det troligt att gastrycket är högre i "tillstängda" områden där metangasen samlas, än i de områden som står i jämvikt med atmosfären. Då markkoncentrationen av metangas jämförs med resistivitetsprofilerna i figur 4.5 från lager 1 (0-0,125m) och lager 2 (0,125-0,394m) kan man se att högresistiva områden i resistivitetsdatan motsvaras väl av hög uppmätt metankoncentration i marken. Detta gäller den vänstra halvan av undersökningsytan. De högresistiva områdena i den högra halvan förklaras inte av gaskoncentrationsmätningarna på 20cm djup.





Figur 4.2. Interpolerade bilder över CH_4 - och O_2 -koncentration 20cm under markytan (överst) kan jämföras med resistiviteten i lager 1 (0-0,125m) och lager 2 (0,125-0,394m) (nederst). Överensstämmelsen mellan CH_4 -koncentration och hög resistivitet är god i undersökningsområdets vänstra hälft.

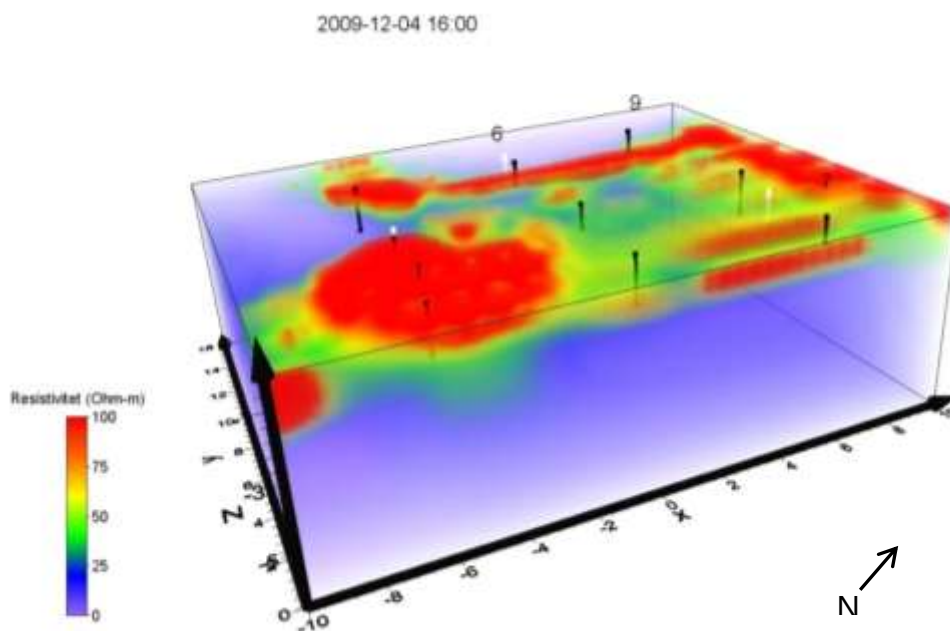
Resultatet av gasflödesmätningarna vid markytan som pågick under två veckor visade en samstämmighet med de rumsliga gaskoncentrationsmätningar och gasflödesmätningar som utfördes av Hamburgs universitet under två dagar (figur 3.15 i kapitel 3.2). Högst metan- och koldioxidflöden uppmättes i punkt C, följt av punkt B och D. Metanflödena i punkt A var mycket små. Alla gasmätningar, både gaskoncentration i marken och gasflöden vid markytan, tyder alltså på att det verkligen är gas vi ser som högresistiva områden i undersökningsytans vänstra del. Även laserscanningarna är samstämmiga med dessa resultat, se figur 3.15. Dock tyder resultaten från gasmätningarna på att den långsträckt vertikala resistivetsanomalin vid $x=18-20\text{m}$ i figur 4.2 orsakas av något annat än gas.

I figur 4.3 visas porttryckssensorerna tillsammans med resistivitetsdistributionen den 4 december i en 3D-vy. Även de tre temperaturproberna har markerats i figur 4.3 med vita markörer. Numren på de sensorer där gas eventuellt kunde påvisas enligt tabell 3.1 i kapitel 3.2 har markerats i figuren. Av de fyra markerade senso-



rerna är det nummer 1 och 7 som sticker ut mest i både tabell 3.1 och figur 3.17 i kapitel 3.2; i sensor 7 registrerades en kraftig portryckstopp i början av mätperioden (november), varefter portrycket sakta steg något under resten av mätperioden. Sensor 1, som befinner sig mitt i ett av de områden där resistiviteten varierar som mest, varierar mest av alla portryckssensorer (med undantag för sensor 7) och visar låg samstämmighet med lufttrycket.

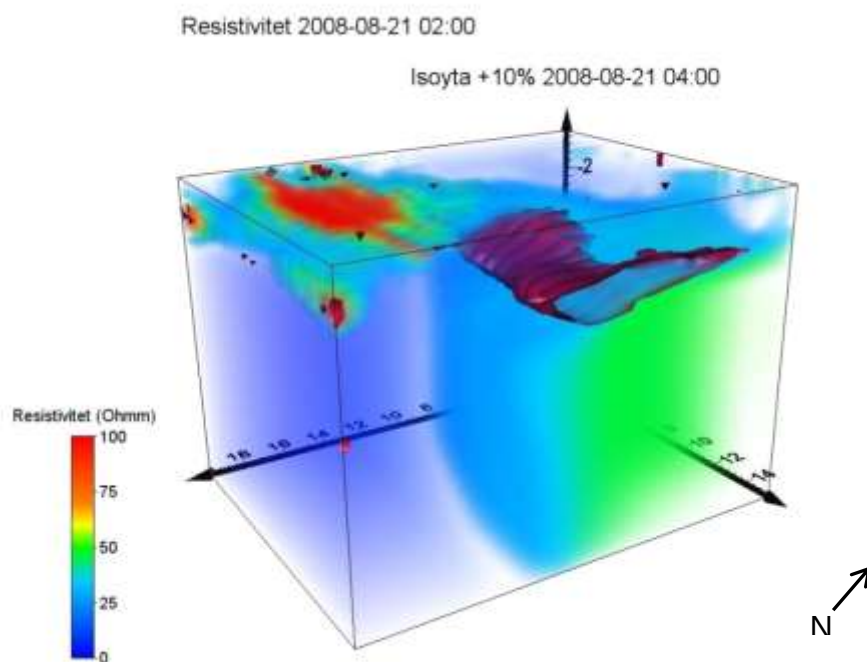
Platserna för portryckssensorerna 1, 6 och 7 befinner sig alla inom områden med både förhöjd CH_4 -förekomst på 20cm djup under markytan och hög resistivitet i ytnära lager (se figur 4.3). Intressant att notera är även att sensor 7 är belägen i ett område med hög resistivitet strax under markytan men låg i det ytligaste lagret (se figur 4.5 nederst), vilket kan innebära att det finns mycket lera eller annat lågpermeabelt material i markytan här som förhindrar gas från att nå atmosfären. En möjlig tolkning till den ovanligt höga portryckstoppen i början av mätperioden i sensor 7 är att ett högt tryck tillåts att byggas upp i marken p.g.a. det lågpermeabla ytmaterialiet, varefter det vid något tillfälle skapas en tillräcklig tryckgradient för att gasen ska kunna transporteras antingen till atmosfären eller till någon annan del av marken.



Figur 4.3. 3D-modell över resistivitet den 4 december 2009 tillsammans med portrycksrör (svart) och temperatururprober (vitt). De portryckssensorer som eventuellt påvisade gas har markerats med sensorns nummer.



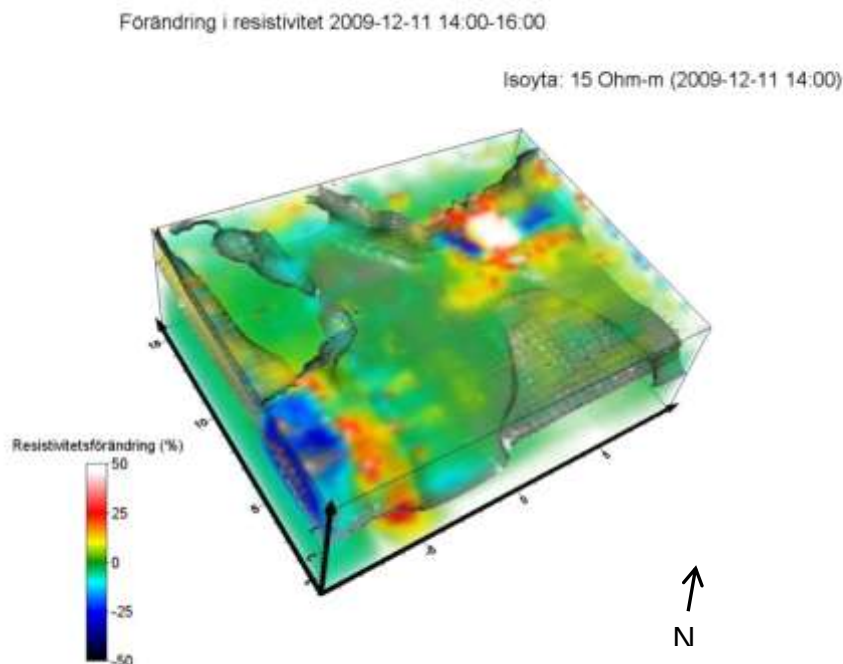
4.3 Variationer i resistivitet; 3D-visualiseringar av detaljerade time lapse mätningar



Figur 4.4. Resistivitet från den 21:e augusti 2008 kl. 02:00 visualiserat tillsammans med en isoyta som visar 10% ökning i resistivitet mellan 02:00 och 04:00 samma datum.

I figur 4.4 visas en resistivitetsmodell från Fas 1 (sommaren 2008) kombinerat med en isoyta som visar var de största ökningarna i resistivitet skedde den 21 augusti mellan 02:00 och 04:00. Stora variationer i resistivitet återkommer i samma område vid flera andra tillfällen. Lokalen för det område där stora förändringar sker vid vissa tidpunkter sammanfaller med ytan på den mer högresistiva struktur som syns på djupet i högra delen av området.

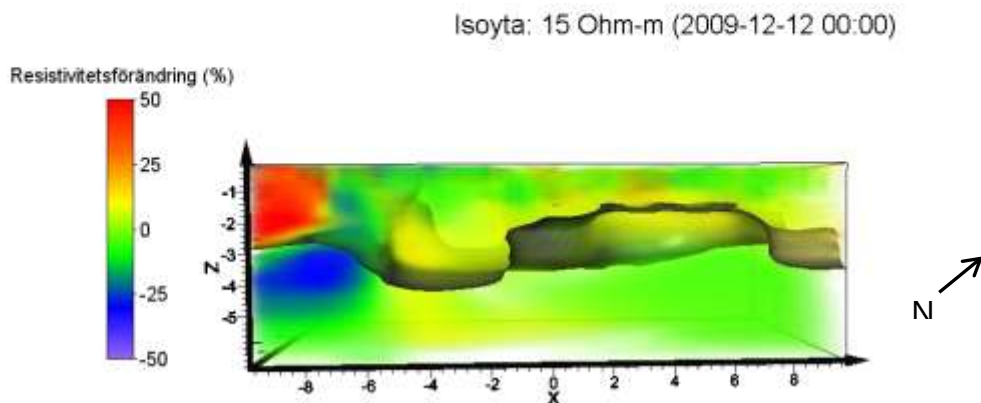




Figur 4.5. Den procentuella förändringen i resistivitet mellan 14:00 och 16:00 den 11 december 2009 visualiserat tillsammans med en isoyta som visar resistivetsvärdet 15Ωm kl. 14:00 samma datum.

I figur 4.5 har ett tillfälle med ganska dramatiska förändringar mellan två tidssteg från Fas 2 (vintern 2009) visualiserats kombinerat med den isoyta som illustrerar deponins allmänna struktur, d.v.s. gränserna för särskilt lågresistiva områden så som vattenmättade delar vid markytan. Man kan se att de stora (även återkommande) variationerna i resistivitet förekommer i närheten till vattenmättade zoner på deponin. Förändringarna inom dessa områden är mycket stor relativt sett.

Förändring i resistivitet 2009-12-12 00:00
- 2009-12-04 16:00

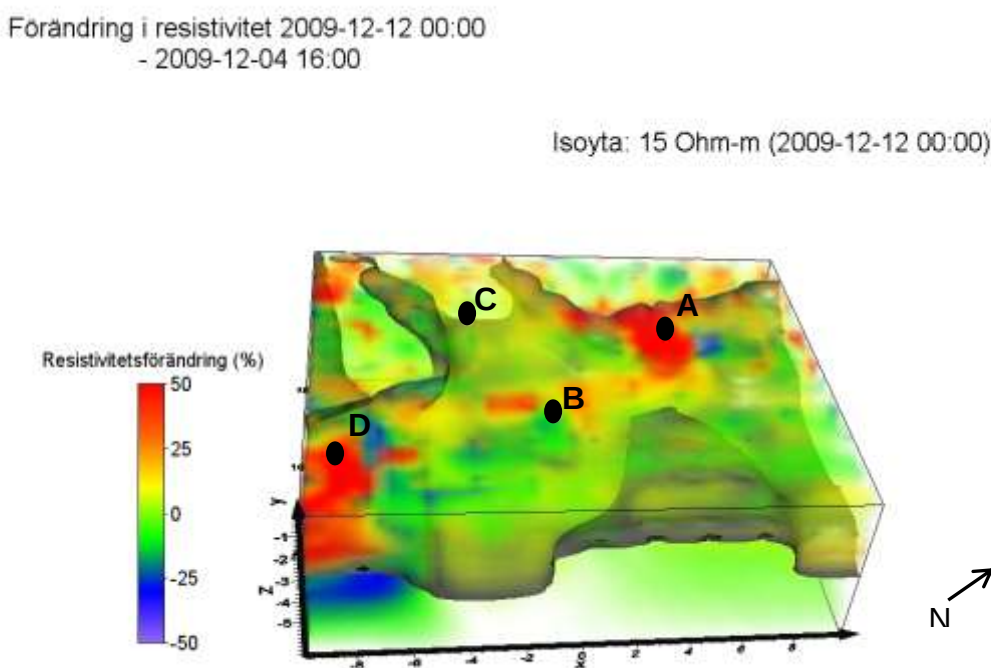


Figur 4.6. Den procentuella förändringen mellan den 12 och 4 december visualiserat tillsammans med en en isoyta som visar resistivetsvärdet 15Ωm den 12 december, sett från sidan.



I figur 4.6 visas den totala förändringen i resistivitet den 12 december relativt den 4 december från sidan, med en isoyta som visar distributionen av resistivitetsvärdet $15\Omega\text{m}$. Isoytan kan antas ungefärligen visa begränsningen mellan det täckande jordlagret och avfallslagren/kompostvallen nedanför vid ca $x = -10$ till -6 meter och $x = -2$ till $+8$ meter (att isoytan går ner mellan -6 och -2 meter beror troligen på att området är kraftigt högresistivt, jämför med figur 4.8 nedan). Vid ca -7 till -8 meter har jordprovtagningarna visat att jorddjupet ner till avfallet är ungefär 2 meter, vilket stämmer väl överens med isoytan i figur 4.6. På motsvarande sätt ligger isoytan på ungefär 2 meters djup mellan $x = -2$ till $+8$ meter vilket stämmer överens med jordprovtagningarna.

En rimlig tolkning är att gas i södra hörnet ($x = -10$ till -6 meter) transporteras från kompostvallen till lagren ovanför under mätperioden, vilket visar sig som en minskning i resistivitet i kompostvallen och en ökning i lagren ovanför. Denna tolkning överensstämmer med gasflödesmätningarna vid markytan, som påvisat höga flöden vid mätpunkt D som är belägen i samma område (se figur 4.7 nedan). Resistiviteten ökar även något vid området mellan $x = -5$ till -2 , vilket tyder på att gas transporteras från kompostvallen även i denna riktning.



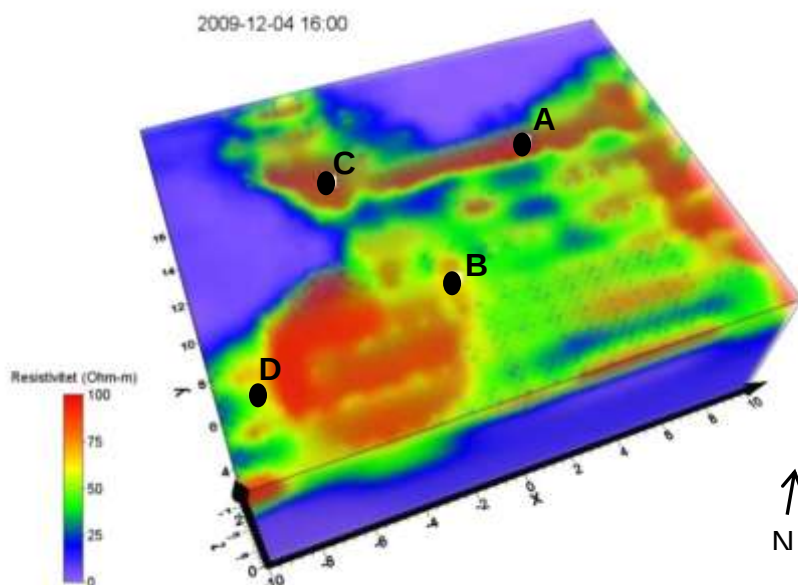
Figur 4.7. Den procentuella förändringen mellan den 12 och 4 december visualiserat tillsammans med en isoyta som visar resistivitetsvärdet $15\Omega\text{m}$ den 12 december, sett snett uppifrån.

I figur 4.7 visas samma bild från en annan vy, tillsammans med lägena för mätpunkterna A-D där gasflöden mättes. Både mätpunkt A (längst till höger) och D (längst till vänster) ligger i områden där resistiviteten i markytan ökat kraftigt över en längre period, medan punkterna C (näst längst till vänster) och B befinner sig i



inom mer neutrala områden. Som påpekats ovan uppmättes höga gasflöden i mätpunkt D, men i mätpunkt A var gasflödena konstant noll eller mycket låga. En intressant iakttagelse av den högresistiva anomalin vid mätpunkt A är att det inte finns någon motsvarande lågresistiv anomali, så som är fallet vid mätpunkt D. Därmed finns inte heller någon uppenbar källa för den eventuella gasen som samlats upp här. Mer sannolikt är kanske att ytmaterialet är tätt vid mätpunkt A, och att gas därför ackumuleras i de yttnära lagren, till skillnad från t.ex. det större området vid mätpunkterna C och B. I dessa punkter uppmättes höga gasflöden, vilket eventuellt skulle kunna förklara varför gasen inte ackumuleras i dessa områden. Mätpunkt A ligger dessutom nära ett vattenmättat område som förhindrar att gasen transporteras vidare i vissa riktningar.

I figur 4.8 visas mätpunkterna A-D tillsammans med en bild över den generella resistivetsdistributionen i undersökningsområdet. Man kan se att mätpunkterna C och B ligger inom högresistiva anomalier, vilket på ytterligare ett sätt kan förklara deras höga gasflöden; ifall gasmängden är konstant hög i marken under mätpunkterna krävs det inte så högt tillflöde över tid från andra områden för att gasflödet ska vara konstant högt i dessa punkter.



Figur 4.8. Resistivetsmodell från 4 december 2009 tillsammans med gasflödesmätpunkterna A-D (vita markörer).

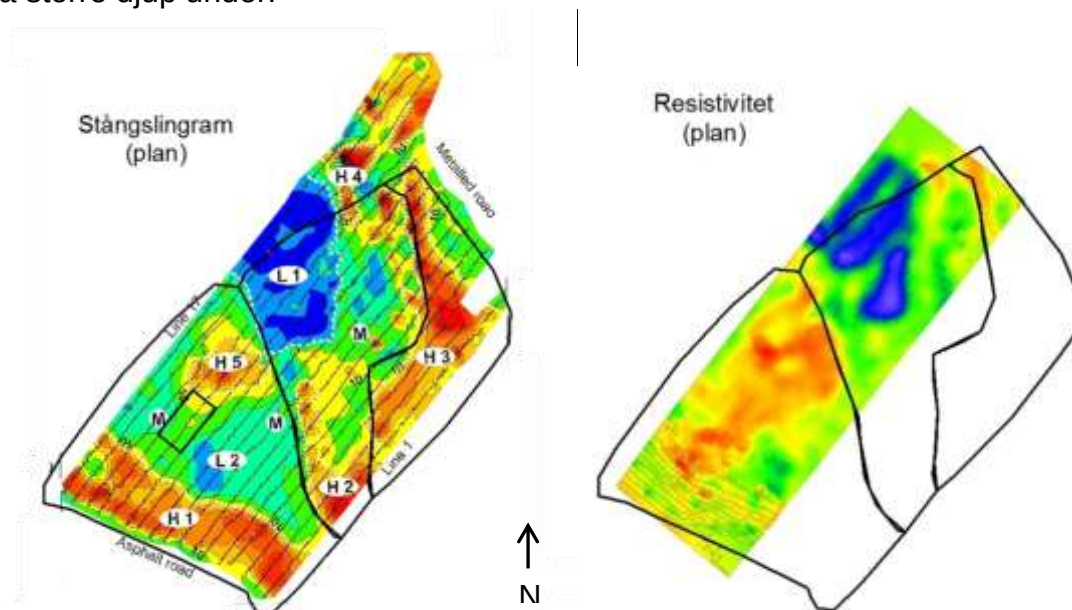
En generell bild av gasflödena under markytan i deponin är att kompostvallen utgör den primära källan av deponigasen, som sedan transporteras främst rakt uppåt mot markytan men även i horisontell led till resten av deponin, där den emitteras till atmosfären genom markytan. I den nordvästra halvan av deponin verkar dock ytmaterialet vara tillräckligt tätt för att gasen ska stanna under markytan.

4.4 Storskaliga mätningar för utveckling av metodik i fullskala

Resultaten från mätningarna med stångslingram gav en god överensstämmelse med resultaten från de storskaliga mätningarna av resistivitet, se figur 4.9. Det bekräftar att metoden kan användas för att scanna av ett större område när syftet till exempel är att lokalisera ett mindre område för mer detaljerade resistivetsmät-



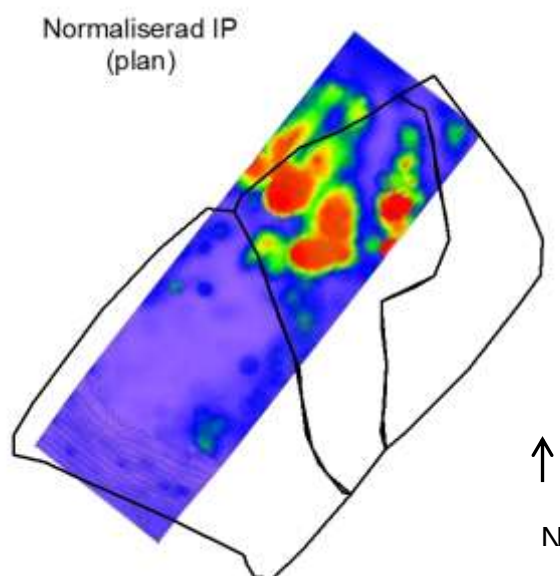
ningarna. Begränsningen med stångslingram i förhållande till traditionella resistivitetmätningar är att man endast får yttäckande resultat av resistivitet integrerat över några få meter under markytan, utan information om resistivitetsförhållanden på större djup under.



Figur 4.9. Storskaliga mätningar av resistivitet med stångslingram (vänster) och resistivitet (höger) som plankartor. De svarta polygonerna motsvarar områdena A, B och C på Filbornadeponin enligt figur 2.8.

IP visade sig vara en framgångsrik metod för att karaktärisera deponins inre struktur, eftersom höga IP-effekter syntes i avfallsmaterialet och låga i naturligt material som till exempel i sluttäckningen. Tidigare studier har tydligt visat detta fenomen. Normaliserad IP illustrerade denna inre struktur ännu tydligare (figur 3.29 och 3.30). Att det verkligen är avfallsmaterialet som ger utslag i IP-data styrktes ytterligare genom att IP-effekter syns direkt i markytan vid ca 200-250m i nordostlig riktning, alltså i det område där ingen sluttäckning fanns vid fältmätningarna, se figur 4.10.





Figur 4.10. Storskaliga mätningar av normaliserad IP som plankarta. De svarta polygonerna motsvarar områdena A, B och C på Filbornadeponin enligt figur 2.14.

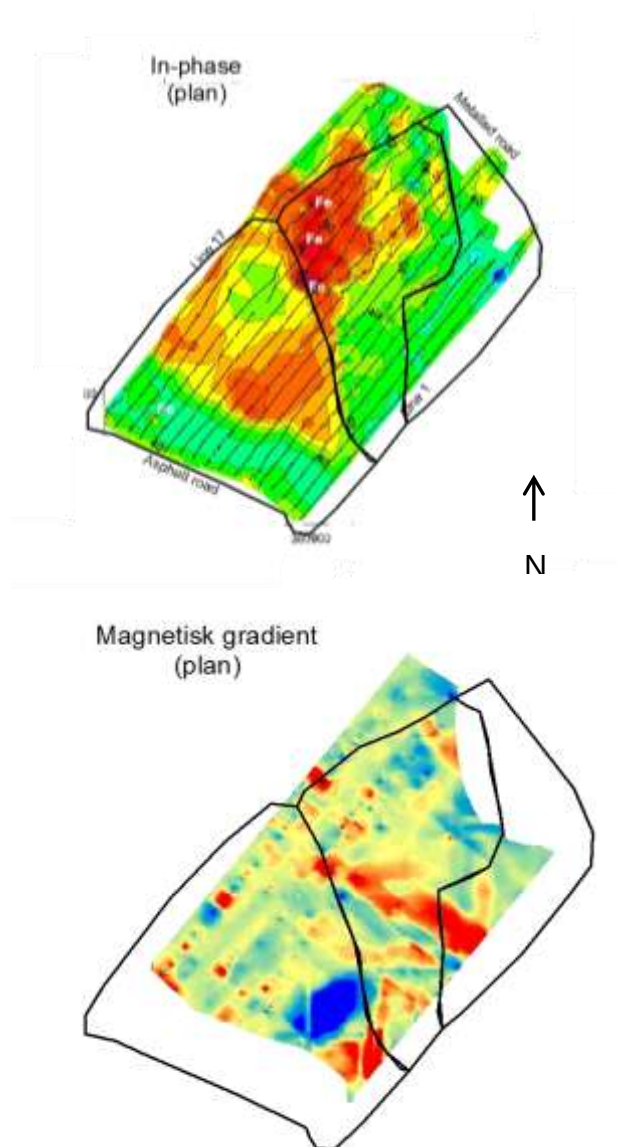
De storskaliga resistivitetsmätningarna och resultaten från refraktionsseismiken gav indikationer på att grundvattenytan befinner sig ca 15 meter under markytan; resistiviteten eftersom den minskar på denna nivå jämfört med övre lager, och seismiken eftersom kompressionsvågshastigheten ökar. Storleken på kompressionsvågshastigheten både över och under grundvattenytan antyder att hållfastheten är jämförbar med porös sand eller grus alternativt lera ovan grundvattennivån (Möller, B. et al., 2000).

Om man jämför de detaljerade resistivitetsmätningarna i Steg 3 med resultaten från ytvågsseismiken, kan man ana en viss samstämmighet mellan dessa, då en lagergräns syns vid ca 4 meters djup i båda mätningarna. Detta skulle kunna betyda att sluttäckningen (det övre högresistiva lagret) har en högre skjuvsvågshastighet än avfallslagret. Detta kan bero antingen på att densiteten är lägre eller skjuvmodulen är högre i sluttäckningsmaterialet jämfört med avfallslagret. Trots skillnaden i skjuvsvågshastighet mellan det övre och undre lagret är båda hastigheterna generellt låga och motsvarar normala skjuvsvågshastigheter för lera och silt (Möller, B. et al., 2000). Resultaten från de båda seismiska metoderna tyder alltså på att hållfastheten i deponin är låg.

Magnetometri och in-phase-komponenten från stångslingramsmätningar är jämförbara då utslagen i båda fall beror på den magnetiska susceptibiliteten i marken. In-phase mäts dock genom elektromagnetisk induktion till skillnad från magnetometri där fältstyrkan registreras utan att något externt fält skapas. Följaktligen är in-phase till skillnad från fältstyrkan från magnetometrimätningar till viss del beroende av inte bara magnetiska utan även elektriska egenskaper i marken. I projektet hittades ingen uppenbar korrelation mellan de båda mätmetoderna, se figur 4.11. Tolkningen av resultaten försvåras dessutom av att det troligen finns mycket metallföremål vid eller strax under markytan som inte observerats eller mätts in under fältmätningarna med respektive metod. Mer storskaliga anomalier i resultaten av magnetometerundersökningarna, både i totalfältet och i gradientmätningen,



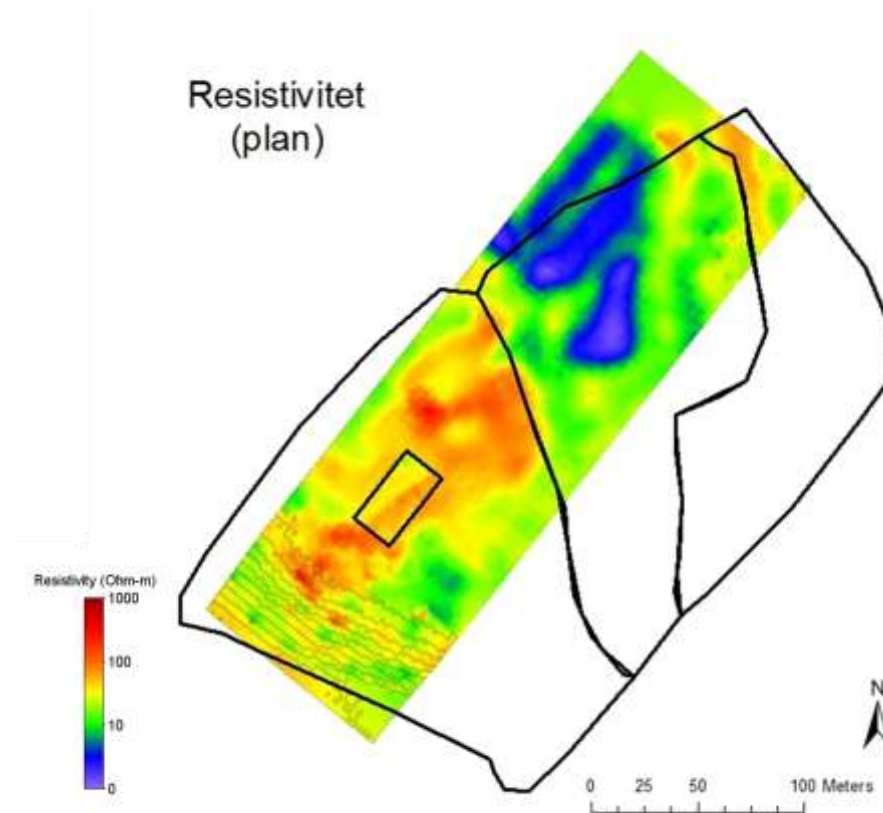
kan dock sannolikt indikera en varierande metallförekomst i det deponerade materialet.



Figur 4.11. Storskaliga mätningar av in-phase mätt med stångslingram (vänster) och magnetisk gradient mätt med magnetometri (höger). De svarta polygonerna motsvarar områdena A, B och C på Filbornadeponin enligt figur 2.14.

4.5 Erfarenheter från Steg 2 applicerat på de detaljerade mätningarna i Steg 3
Ett av syftena med de detaljerade mätningarna av resistivitet i Steg 3 var att, baserat på erfarenheter från fördjupningen i Steg 2, undersöka om det fanns zoner som indikerar gas. Undersökningsområdet för de detaljerade resistivetsmätningarna valdes baserat på de storskaliga resistivetsmätningarna och placerades i ett hög-resistivt område, se figur 4.12.

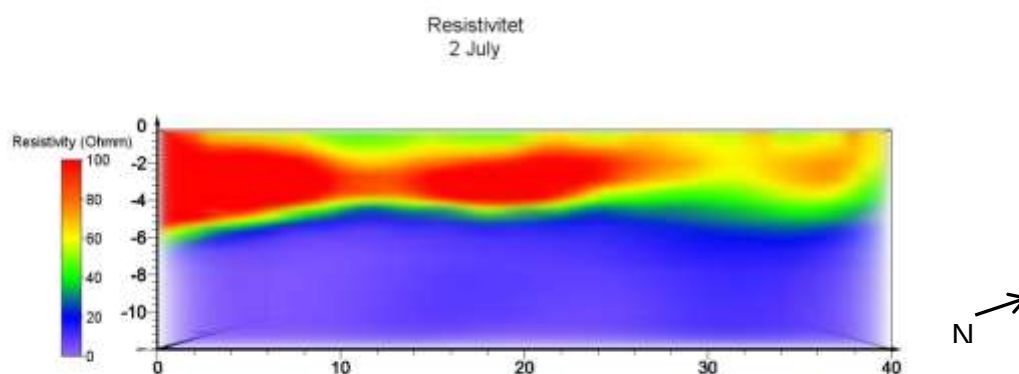




Figur 4.12. Storskaliga- och detaljerade mätningar av resistivitet som plankarta. De svarta polygonerna motsvarar områdena A, B och C på Filbornadeponin enligt figur 2.14, och den svarta rektangeln anger mätområdet för de detaljerade resistivetsmätningarna.

I figur 4.12 är resultaten av de småskaliga mätningarna från Steg 3 lagda som plankarta ovanpå de storskaliga mätningarna i samma område. Det är tydligt att de storskaliga mätningarna, utförda under sommaren 2010, stämde väl överens med de detaljerade mätningarna som utfördes sommaren 2011, alltså ett år efter de storskaliga mätningarna. I den detaljerade mätningen var som tidigare nämnts resistiviteten hög i det övre lagret och översteg i vissa områden $200\Omega\text{m}$. I figur 4.13 visas resistivetsmodellen, baserad på de detaljerade mätningarna, från sidan.

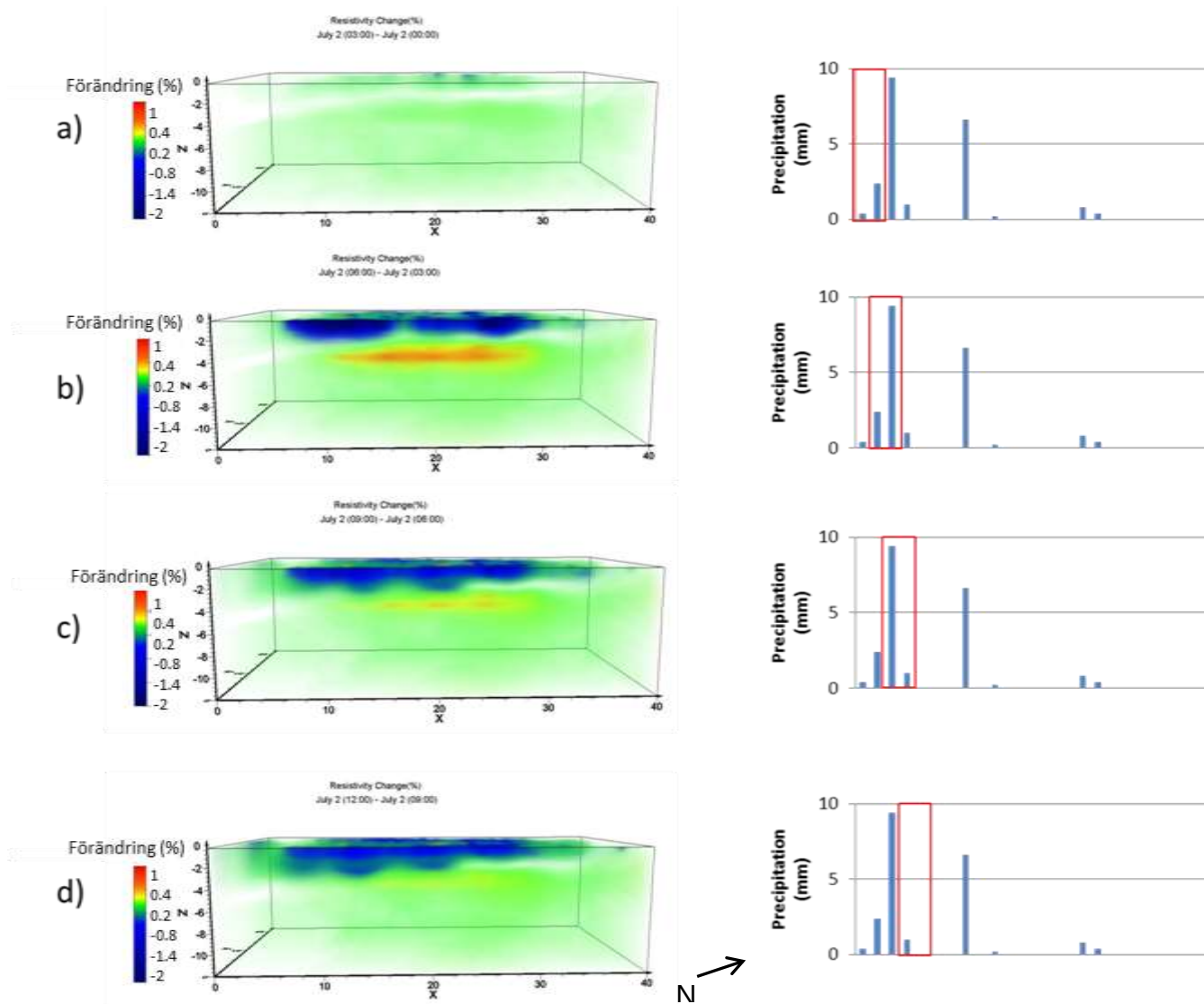




Figur 4.13. Resistivitetsmodell från de detaljerade resistivitetsmätningarna den 2 juli 2011, sett från sidan.

Variationerna i resistivitet var generellt små under de detaljerade mätningarna av resistivitet i Steg 3, jämfört med den del av deponin som det mättes på i Steg 2. Detta kan som tidigare diskuterats bero på flera anledningar relaterade till de lokala förutsättningarna i undersökningsområdet och väderförhållanden. Den procentuella förändringen i resistivitet jämfört med föregående tidssteg under en period med intensivt regn visas i figur 4.14 a-d med en färgskala från -2% (blått) till +1% (rött). I a) visas förändringen mellan den 2 juli 00:00 och 03:00 tillsammans med nederbörden (aktuella klockslag markerade med röd rektangel). Bilden visar att inga större förändringar i resistivitet sker i början av nederbördstillfället. I b) visas att under följande tre timmar (mellan 03:00 och 06:00) intensifieras nederbördsmängden och ger avtryck som en relativt stark minskning i resistivitet i de yt-nära lagren. Samtidigt ökar resistiviteten på ca 4 meters djup under markytan. c) Mellan 06:00-09:00 avtar nederbörden igen, och minskningen i resistivitet är inte lika intensiv. Däremot når minskningen större djup. d) Kl. 09:00-12:00 fortsätter både regnet och resistivitetsminskningen att avta. Liknande effekter av artificiell nederbörd (bevattning) på deponiceller har redovisats i ett flertal publikationer, till exempel Rosqvist et al. (2005) och Rosqvist et al. (2007).





Figur 4.14. Procentuell förändring (-2% till 1%) i resistivitet tillsammans med nederbördsdata från den 2 juli 2011 mellan a) kl. 00:00-03:00, b) 03:00-06:00, c) 06:00-09:00 och d) 09:00-12:00. De röda rutorna i nederbördsdiagrammen motsvarar tidsperioden för respektive resistivitetsmodell.

Den ökning av resistivitet som syns i figur 4.14 b) i samband med intensiva nederbörds mängder kan möjligen bero på ett ökat gastryck i marken då vatten ockuperar en stor del av porvolymen. Denna tolkning baseras på erfarenheter från mätningar under både Fas 1 och Fas 2 – Steg 2 (Johansson, S. et al 2011).



5. Slutsatser

Inom ramen för malagaprojektet har stora mängder data genererats, i Fas 1 (2007–2009) och i Fas 2 (2009–2011). I detta kapitel lyfter vi fram de viktigaste slutsatserna som kan dras från arbetet i Fas 2, men vi lyfter även fram viktiga slutsatser som framkommit i analyser av jämförelser mellan mätningarna i Fas 1 och Fas 2.

Slutsatserna från Fas 2 baseras på resultat av tre stora fältkampanjer utförda på Filborna deponin i Helsingborg inom Steg 2 och 3. Dessa tre fältkampanjer genomfördes vintern 2009, sommaren 2010 och sommaren 2011. Arbeta inom Steg 4 (Fas 2) av malagaprojektet pågår under våren 2012 och redovisas därför inte i våra slutsatser. De tre projekt som pågår under Steg 4 är Albäcksdeponin i Trelleborg (SYSAV), Stena metalls deponi Halmstad, samt Flishultsdeponin i Vetlanda (VETAB).

5.1 Detaljerade mätningar

De viktigaste slutsatserna av steg 2 (och detaljerad mätning i steg 3):

- Ett tydligt samband finns mellan anomalier med hög resistivitet och gasflöde vid markytan samt CH₄-koncentration i marken. Även porttrycksmätningar ger indikationer på gasförekomst i högresistiva områden.
- Markens resistivitet beter sig på olika sätt beroende på säsong. Då variationerna över tid är stora och svårtolkade på vintern, är de mindre och lättare att koppla till variationer i vädret under sommaren.
- Svårigheterna med tolkningen av resistivitetsförändringarna på vintern grundar sig i en stor mängd porvatten och högst varierande väderförhållanden under december 2009, vilket resulterade i bl.a. frys-tö-cykler i marken och snötäcke över undersökningsområdet. Vattnets kraftiga dynamik i markporerna verkar maskera processer som kan kopplas till deponigasens rörelse till följd av förändringar i omgivningen exempelvis marktemperatur eller markfuktighet. Vidare förekom problem med datakvalitet i samband med frusen mark som följd av försämrade elektrodkontakt, vilket kan vara en bidragande orsak till att dessa resultat är svårtolkade.
- Under både sommar och vinter verkar kraftig nederbörd vara den faktor som spelar störst roll för utsläpp av deponigas från markytan. Det infiltrerande vattnet tycks skapa förhöjt gastryck i marken vilket leder till ett ökat utsläpp av gas från markytan som följd av att gasen trängs undan av det infiltrerande vattnet. Vid mindre intensiv nederbörd minskar istället gasutsläppen p.g.a. att markytans porer får en högre vattenhalt och blir mindre genomsläppliga.
- Ovan nämnda process kan urskiljas i resistivitetsdata från sommarsäsongen genom att markytan minskar i resistivitet vid ett kraftigt regn medan lagren strax under ökar i resistivitet.
- En generell bild över gasflödena under markytan på Filbornadeponin är att gasen transporteras från kompostvallen i de södra delarna av undersökningsområdet främst rakt uppåt mot markytan men även i horisontell led till



resten av deponin, där den emitteras till atmosfären genom markytan. I den nordvästra halvan av deponin verkar dock ytmaterialet vara tillräckligt tätt för att gasen ska stanna under markytan.

5.2 Storskaliga mätningar

De viktigaste slutsatserna av steg 3:

- Storskaliga resistivitetsmätningar och mätningar med stångslingram visar god överensstämmelse. Stångslingram är en betydligt snabbare metod, men ger endast en plankarta som resultat till skillnad från resistivitet och IP där resultaten kan presenteras som en 3D-volym.
- Resistivitet och IP (och normaliserad IP) gav en god uppfattning om deponins inre struktur och sluttäckning.
- Resistivitet gav i kombination med refraktionsseismik en tolkning av grundvattenytans läge.
- Resistivitet kan i kombination med refraktions- eller ytvågsseismik ge en uppfattning om hållfastheten i avfallslagren.
- Stångslingram in-phase och magnetometri gav inga uppenbara korrelationer med varandra, men storskaliga anomalier från magnetometrimätningen kan sannolikt ge indikationer på avvikelser i metallförekomst i avfallslagren.
- Detaljerade time lapse mätningar med resistivitet bekräftade det mönster man tidigare sett i samband med intensiva regn. Under infiltration av regnvatten ökade resistiviteten något strax under markytan. Dock kunde inga zoner med hög variation i resistivitet över tid identifieras på det område som valts ut för detaljerade resistivitetsmätningar. Därmed fanns inga zoner som direkt indikerade en hög förekomst av deponigas i detta område.



6. Referenser

- Dahlin, T. (2011) Resistivity-IP Surveying for Engineering and Environmental Applications Using Multi-Electrode Equipment, Procs. Fifth All-Russia School-Workshop on Electromagnetic Sensing of the Earth - EMS-2011, St. Petersburg, 16-21 May 2011, Book 2, 252-255.
- Dahlin, T. (2012) Application of Resistivity-IP to Mapping of Groundwater Contamination and Buried Waste, in Procs. Seminar on Environmental Geophysics, Dublin, 15th February 2012, Geophysical Association of Ireland, p 1-6.
- Dahlin, T., Rosqvist, H., Leroux, V., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2008. Potential of Geoelectrical Imaging Techniques for Detecting Subsurface Gas Migration in Landfills - An Experiment. Near Surface 2008 - 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Kraków, Poland, 15-17 September 2008.
- Dahlin, T., Leroux, V., Rosqvist, H., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2008. Geoelectrical Resistivity Monitoring for Localizing Gas at Landfills. Near Surface 2009 - 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Dublin, Ireland, 7 - 9 September 2009.
- Dahlin T., Rosqvist H., Johansson S., Månsson C.-H., Svensson M., Lindsjö M., Loke M.H. (2011) Geoelectrical Monitoring for Mapping of Gas and Water Migration in Landfills, in Abstracts 1st International Workshop on Geoelectrical Monitoring, GELMON 2010, Vienna, 30.11.-2.12.2011, 1 p.
- Dahlin, T. Rosqvist H., Johansson S., Svensson M., (2012) Resistivity-IP characterisation and short term monitoring at Filborna waste deposit, Procs. 74th EAGE Conference, Copenhagen, 4-7 June 2012, EAGE, 4 p.
- Davidson, E.A., Savage, K., Verchot, L.V., Navarro, Rosa. 2002: Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. In: Agricultural and Forest Meteorology, Volume 113, Issues 1-4, 2 December 2002, Pages 21-37.
- [Johansson, S., Rosqvist, H., Svensson, M., Dahlin, T., Leroux, V. 2011: An alternative methodology for the analysis of electrical resistivity data from a soil gas study. In: Geophysical Journal International, Volume 186, Issue 2, pages 632-640, August 2011](#)
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C. 1966: Electrical methods in geophysical prospecting. London
- Keary, P. & Brooks, M. 1991: An Introduction to Geophysical Exploration. Second edition. London, UK.
- Loke and Barker 1996, www.geoelectrical.com
- Möller, B., Larsson, R., Bengtsson P-E., Moritz, L., 2000: Statens geotekniska institut. Geodynamik i praktiken. Information 17. Linköping 2000.
- Powrie, W., and Rosqvist, H. 2011 Editorial. Waste and Resource Management 164: 1-2.
- Robinson, E.S., and Coruh, C. 1988: Basic exploration Geophysics, Wiley, New York, 562p.
- Rosqvist, H. and Dahlin, T. (2010) Geoelectrical imaging for detection of water migration in a bioreactor landfill. Application of Geophysics to engineering and environmental problems. Symposium. 23rd 2010. (SAGEEP 2010) (2 Vols).
- Rosqvist, H., Dahlin, T., and Lindhé, C (2005). Investigation of water flow in a bioreactor landfill using geoelectrical imaging techniques. Proceedings Sardinia-05, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.
- Rosqvist, H., Dahlin, T., Linders, F., Meijer, J-E (2007) Detection of water and gas migration in a bioreactor landfill using geoelectrical imaging and a tracer test. Proceedings Sardinia-07 Eleventh international waste management and landfill symposium, Italy.
- Rosqvist, H., Dahlin, T., Leroux, V., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2008. Potential of geo-electrical imaging techniques for detecting subsurface gas migration in landfills. ICLRS-08 - Intercontinental Landfill Research Symposium. Colorado, USA, September 2008.
- Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Månsson, C-H., Lindsjö, M. 2009: Detektering av gas i deponier med resistivitet. SGC Rapport 2008.
- Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Månsson, C-H., Lindsjö, M., 2009. Detektering av gas i deponier med resistivitet. SGC 208. Avfall Sverige U2009:19.
- Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2009. An evaluation of the potential of the geoelectrical resistivity method for mapping gas migration in landfills. HPM3 workshop, 10-12 March 2009, Braunschweig, Germany
- Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H. and Johansson, S. 2009. An evaluation of the geoelectrical resistivity method for mapping gas migration in landfills. Proceedings Sardinia -09, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.



- Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., and Johansson, S. 2011. Mapping landfills gas migration using resistivity monitoring. *Waste and Resource Management* 164:3-15.
- Rosqvist, H., Johansson, S., Streblow, C., and Gebert, J. (2011) Spatial and temporal variability of gas migration at the surface of a MSW landfill. *Proceedings Sardinia-11, Thirteen International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.*
- Rosqvist, H., Johansson, S., Dahlin, T., Leroux, V., and Svensson, M. (2011) Development of 3D geoelectrical resistivity for mapping of gas migration in landfills. *Proceedings Sardinia-11, Thirteen International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.*
- Sharma, P.V. 1997: *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge, UK.
- Torstensson, B.A.(1984). A new system for ground water monitoring. *Ground water monitoring Review* 4, no 4:131-138.
- VOGUE-project (Visualiasation of Gas for the Utilities and the Environment, EU-report NNE5-1999-20031, August 2004.
- Kansas Geological Survey. SurfSeis 2: <http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/index.html>
- Siemens, Ultramat 23: <http://www.automation.siemens.com/w1/automation-technology-ultramat-23-19005.htm>
- Slater, L. , Lesmes, D. (2002). IP interpretation in environmental investigations. *GEOPHYSICS*, VOL. 67, NO. 1 (JANUARY-FEBRUARY 2002); P. 77 – 88, 10 FIGS. 10.1190/1.1451353



7. Bilaga

Bilaga 1-6: Tillämpningsområden som har utvecklats och testats inom MaLAGa-projektet Fas 2.

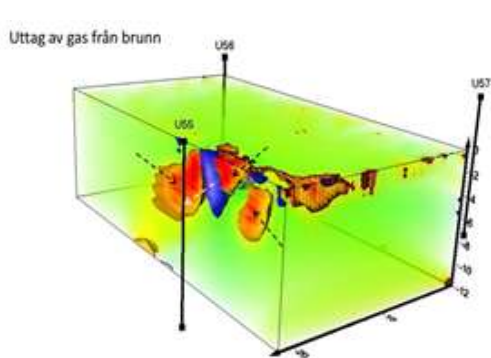
1. Detektering av gas i deponier
2. Detektering av vatten i deponier
3. Deponiers inre struktur
4. Landfill mining
5. Deponiers sluttäckning
6. Äldre deponiers utbredning



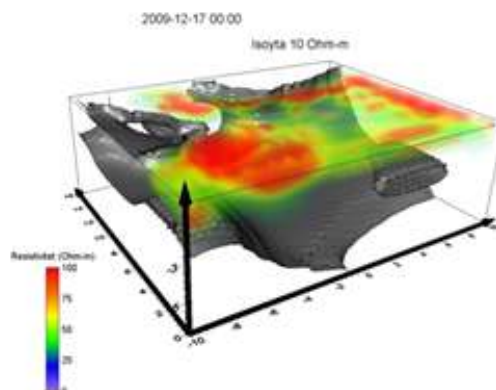
Bilaga 1 (6)

DETEKTERING AV GAS I DEPONIER

Geoelektriska metoder, resistivitet och inducerad polarisation (IP) kan användas som alternativ till traditionella metoder för detektering av gasrörelser i deponier. De traditionella metoder som används är oftast beräkningar eller flödesmätning på markytan. En fördel med de geoelektriska metoderna är att man snabbt kan scanna över stora områden och visualisera gasförekomst i 2D och 3D, vilket innebär att metoderna är snabba och kostnadseffektiva. Metoderna har utvecklats mycket under senare år, framförallt när det gäller visualisering i 3D, och för mätningar över tid.



Uttag av deponigas ur en gasbrunn vid Ahlbäcksdeponin i Trelleborg. Variation i resistivitet signalerar gasrörelserna vid brunnen.



Områden markerade i rött visar höga resistivitetsvärden vilket signalerar gasrörelser. Deponicellens botten och en vall signaleras med en resistivitets isosyta på 10 ohm-meter.

Resistivitet och inducerad polarisation (IP) är icke-förstörande geofysiska metoder som mäter markens varierande elektriska egenskaper genom att ström sänds mellan elektroder vid markytan. Zoner under mark som innehåller gas signaleras genom relativt hög resistivitet, vilket innebär ett högt motstånd mot ström, medan till exempel vatten signaleras genom lägre resistivitet. Forskningsprojekt har även visat att zoner med högt gasinnehåll signaleras genom att resistiviteten varierar mycket över tid, vilket beror på att gas och vatten i markporerna interagerar. Deponigas kan därför detekteras under markytan genom att man mäter förändringar av resistivitet över tid.

Mätningar för att detektera deponigas utförs oftast på ett cirka 1000 m² stort område, för vilken en 3D-volym mäts med jämna tidsintervall, cirka tolv gånger per dygn. Vid behov kan en inledande storskalig scanning över ett större område med resistivitet eller annan geofysisk metod göras för att underlätta valet av undersökningsyta.

Resultat av mätningar för gasdetektering kan till exempel användas för att:

- Optimera placeringen av gasuttagssystem
- Testa effekten av gasbrunnar som är i drift
- Identifiera känsliga eller dynamiska områden i deponin med avseende på gasrörelser
- Ge underlag till en konceptuell bild över gasflödesmönster på en specifik deponi
- Undersöka hur gasflöden i och från deponin påverkas av väderskiftningar

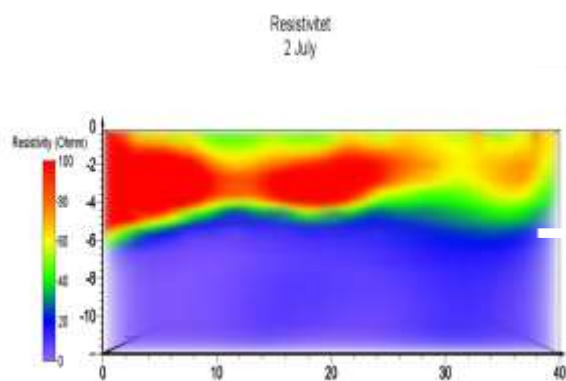
MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt med syfte att utveckla undersökningsmetoder baserade på mätningar med geoelektriska metoder. Styrkan med metoderna är att man kan mäta stora områden på kort tid och få information om bland annat strukturer i både två och tre dimensioner på kort tid till relativt låga kostnader. MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt i samarbete mellan Lunds Universitet-Institutionen för teknisk geologi, Tyréns och avfallsbranschen.

<http://malagageophysics.blogspot.se/>

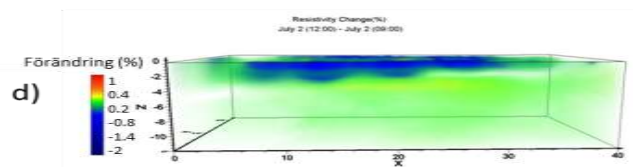
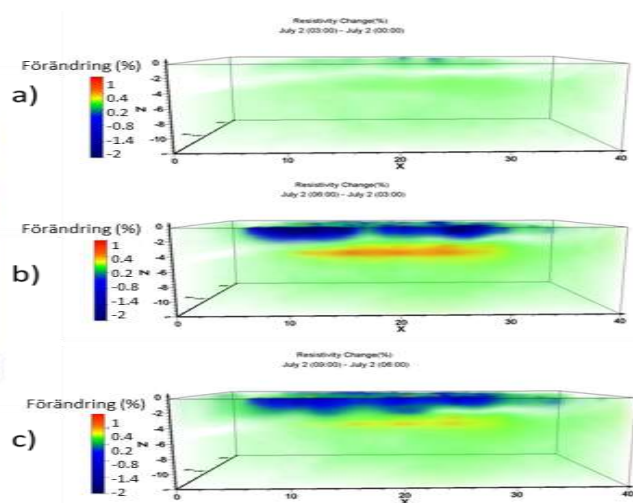


DETEKTERING AV VATTEN I DEPONIER

Geoelektriska metoder, resistivitet och inducerad polarisation (IP) kan användas som alternativ till traditionella metoder för detektering av vattenförekomst i deponier. De traditionella metoder som används är oftast etablering av observationsrör. En fördel med de geoelektriska metoderna är att man snabbt kan scanna över stora områden och visualisera sluttäckningars status i 2D och 3D, vilket innebär att metoderna är snabba och kostnadseffektiva. Metoderna har utvecklats mycket under senare år, framförallt när det gäller visualisering i 3D, och för mätningar över tid.



Den mättade zonen signaleras genom en låg resistivitet och grundvattennivåns läge lokaliserades på cirka 5 meters djup.



Vattenrörelser genom en sluttäckning i samband med kraftig nederbörd.

Resistivitet och inducerad polarisation (IP) är icke-förstörande geoelektriska metoder som mäter markens varierande elektriska egenskaper genom att ström sänds mellan elektroder vid markytan. Zoner under mark som innehåller vatten signaleras genom relativt låg resistivitet, vilket innebär ett lågt motstånd mot elektrisk ström. Vattenrörelser under markytan kan därmed detekteras genom att man mäter förändringar av resistivitet över tid.

För att detektera vattenrörelser utförs mätningarna på ett område som är mellan cirka 1 000 m² och 10 000 m² stort, med jämna tidsintervall, cirka tolv gånger per dygn. Vid behov kan en inledande storskalig scanning över ett större område med resistivitet eller annan geofysisk metod göras för att underlätta valet av undersökningsyta.

Resultat av mätningar för att detektera förekomst av vatten kan till exempel användas för att:

- Optimera placeringen av dräneringssystem
- Testa sluttäckningars effektivitet
- Lokalisera grundvattennivåer
- Uppskatta zoner med högt respektive lågt vatteninnehåll

MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt med syfte att utveckla undersökningsmetoder baserade på mätningar med geoelektriska metoder. Styrkan med metoderna är att man kan mäta stora områden på kort tid och få information om bland annat strukturer i både två och tre dimensioner på kort tid till relativt låga kostnader. MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt i samarbete mellan Lunds Universitet-Institutionen för teknisk geologi, Tyréns och avfallsbranschen.

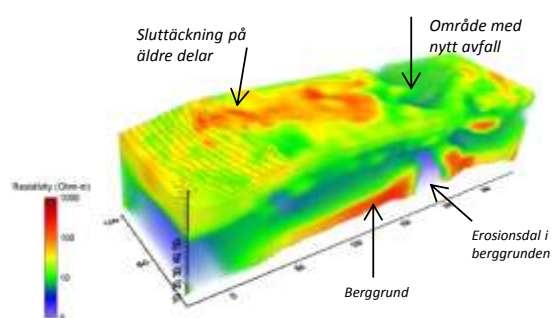
<http://malagageophysics.blogspot.se/>



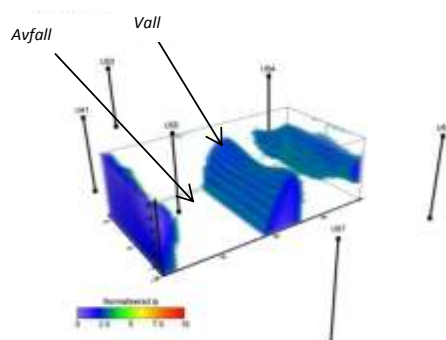
Bilaga 3 (6)

DEPONIERERS INRE STRUKTUR

Geoelektriska metoder, resistivitet och inducerad polarisation (IP) kan användas som alternativ till traditionella metoder för att uppskatta deponiers inre strukturer. De traditionella metoder som används är framförallt borrhning eller grävning. En fördel med de geoelektriska metoderna är att man snabbt kan scanna över stora områden och visualisera sluttäckningars status i 2D och 3D, vilket innebär att metoderna är snabba och kostnadseffektiva. Metoderna har utvecklats mycket under senare år, framförallt när det gäller visualisering i 3D, och för mätningar över tid.



Storskaliga mätningar i 3D som visar deponins inre struktur och storskaliga geologiska formationer under deponin.



Mätningar i 3D som visar en underjordisk vall som avgränsar deponiceller och området med avfall.

Resistivitet och inducerad polarisation (IP) är icke-förstörande geoelektriska metod som mäter markens varierande elektriska egenskaper genom att ström sänds mellan elektroder vid markytan. Kombination av mätningar med resistivitet och IP har visat sig vara ett starkt verktyg för att lokalisera olika materialtyper i deponier.

Mätningarna kan göras på varierande ytor från cirka 1000 m² upp till flera hektar. Mätningar kan utföras både i 2D och i 3D, men de mätningar som utförts i 3D ger i regel en bättre förståelse för deponiers tre dimensionella egenskaper. Vid behov kan en inledande storskalig scanning över ett större område med resistivitet eller annan geofysisk metod göras för att underlätta valet av undersökningsområde.

Resultat av mätningar på deponi kan till exempel användas för att:

- Bestämma olika materialtyper utbredning
- Visualisera inre strukturer som till exempel underjordiska vallar
- Uppskatta en sluttäcknings mäktighet och status
- Ge underlag vid framtida behov av grävning i deponier

MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt med syfte att utveckla undersökningsmetoder baserade på mätningar med geoelektriska metoder. Styrkan med metoderna är att man kan mäta stora områden på kort tid och få information om bland annat strukturer i både två och tre dimensioner på kort tid till relativt låga kostnader. MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt i samarbete mellan Lunds Universitet-Institutionen för teknisk geologi, Tyréns och avfallsbranschen.

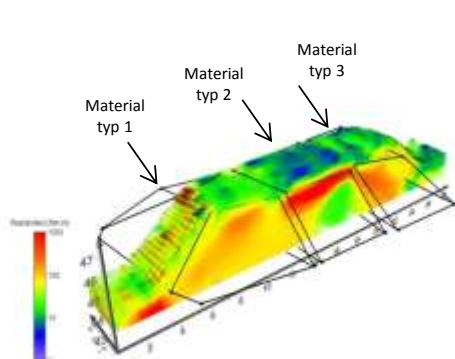
<http://malagageophysics.blogspot.se/>



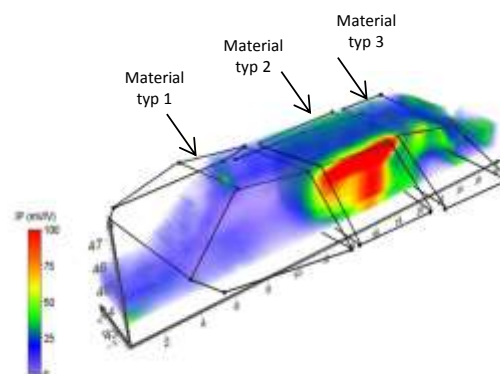
Bilaga 4 (6)

LANDFILL MINING

Geoelektriska metoder, resistivitet och inducerad polarisation (IP) utvecklades för användning inom metallprospektering i början av 1900-talet. Idag utvecklas metoderna för användning inom landfill mining för att detektera och särskilja metaller och andra typer av material i deponier. De geoelektriska metoderna bygger på flerårig forskning och kan användas för att snabbt scanna över stora områden och visualisera zoner i deponier med möjligt innehåll av till exempel metaller. Tekniken medger en snabb och kostnadseffektiva scanning av stora områden.



3D-modell av resistivetsdata från pilotmätningarna på olika materialtyper. Mätningen utfördes på en hög innehållandes väl avskilda celler med tre olika material. Högen var ca 3 m hög, 25 m lång och 16 m bred.



3D-modell av IP-data från pilotmätningarna på olika materialtyper. Mätningen utfördes på en hög innehållandes väl avskilda celler med tre olika material. Högen var ca 3 m hög, 25 m lång och 16 m bred.

Resistivitet och inducerad polarisation (IP) är icke-förstörande geoelektriska metod som mäter markens varierande elektriska egenskaper genom att ström sänds mellan elektroder vid markytan. Kombination av mätningar med resistivitet och IP har visat sig vara ett starkt verktyg för att lokalisera olika materialtyper i deponier.

Mätningarna kan göras på varierande ytor från cirka 1000 m² upp till flera hektar. Mätningar kan utföras både i 2D och i 3D, men de mätningar som utförts i 3D ger i regel en bättre förståelse för olika materialtyper i deponier. Vid behov kan en inledande storskalig scanning över ett större område med till exempel resistivitet/IP eller annan geofysisk metod utföras för att upprätta en storskalig bild av området och därmed underlätta val av undersökningsområde.

Resultat av mätningar för landfill mining kan till exempel användas för att:

- Lokalisera områden med avvikande geoelektriska egenskaper som till exempel kan härledas till metallinnehåll
- Visualisera utbredning av olika materialtyper
- Ge underlag för framtida utgrävningar för materialåtervinning

MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt med syfte att utveckla undersökningsmetoder baserade på mätningar med geoelektriska metoder. Styrkan med metoderna är att man kan mäta stora områden på kort tid och få information om bland annat strukturer i både två och tre dimensioner på kort tid till relativt låga kostnader. MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt i samarbete mellan Lunds Universitet-Institutionen för teknisk geologi, Tyréns och avfallsbranschen.

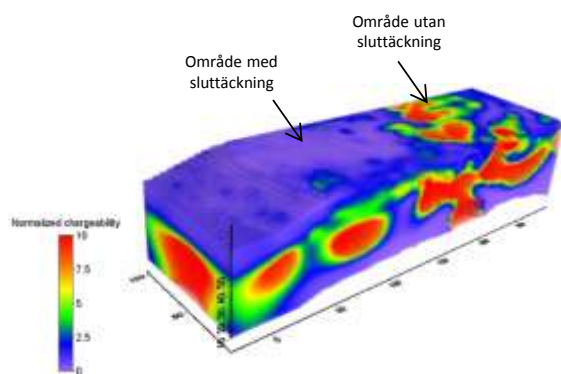
<http://malagageophysics.blogspot.se/>



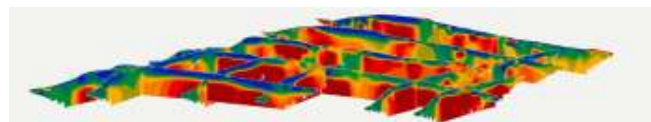
Bilaga 5 (6)

DEPONIERERS SLUTTÄCKNING

Geoelektriska metoder, resistivitet och inducerad polarisation (IP) kan användas som alternativ till traditionella metoder för att besiktiga och kontrollera statusen på deponiers sluttäckningar. De traditionella metoder som används är framförallt borrhning eller grävning. En fördel med de geoelektriska metoderna är att man snabbt kan scanna över stora områden och visualisera sluttäckningars status i 2D och 3D, vilket innebär att metoderna är snabba och kostnadseffektiva. Metoderna har utvecklats mycket under senare år, framförallt när det gäller visualisering i 3D.



Storskaliga mätningar i 3D som tydligt visar område med och utan sluttäckning.



Storskaliga mätningar i 2D som visar sluttäckningens status. Områden med tunn respektive tjockare sluttäckning, och områden helt utan sluttäckning, kunde identifieras.

Resistivitet och inducerad polarisation (IP) är icke-förstörande geoelektriska metoder som mäter markens varierande elektriska egenskaper genom att ström sänds mellan elektroder vid markytan. Kombination av mätningar med resistivitet och IP har visat sig vara ett starkt verktyg för att lokalisera sluttäckningars utbredning och mäktighet. Material som används för byggande av deponiers sluträkningar har ofta andra elektriska egenskaper än avfall vilket medför att sluttäckningarnas utbredning och status kan visualiseras.

Mätningarna kan göras på varierande ytor från cirka 1000 m² upp till flera hektar. Mätningar kan utföras både i 2D och i 3D, men de mätningar som utförts i 3D ger i regel en bättre förståelse för sluttäckningars tre dimensionella egenskaper. Vid behov kan en inledande storskalig scanning över ett större område med resistivitet/IP eller annan geofysisk metod utföras för att underlätta valet av undersökningområde.

Resultat av mätningar på sluttäckningar kan till exempel användas för att:

- Bestämma en sluttäcknings utbredning
- Visualisera en sluttäcknings status
- Uppskatta en sluttäcknings mäktighet
- Ge underlag för framtida utbyggnad av sluttäckning och upprättande av underhållsplaner

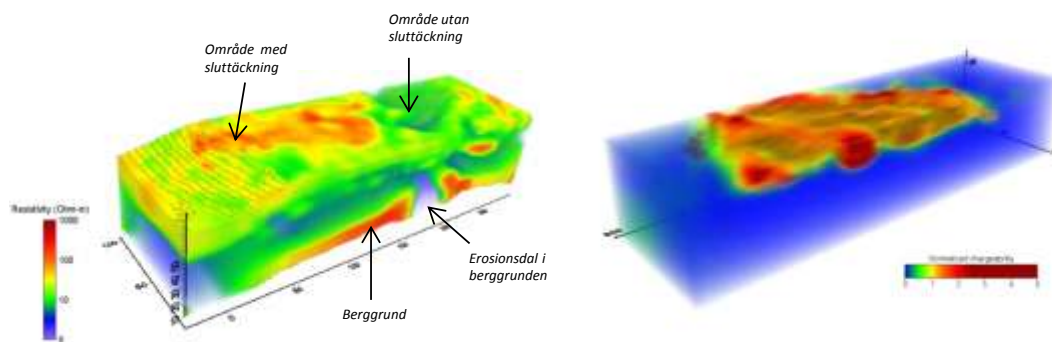
MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt med syfte att utveckla undersökningsmetoder baserade på mätningar med geoelektriska metoder. Styrkan med metoderna är att man kan mäta stora områden på kort tid och få information om bland annat strukturer i både två och tre dimensioner på kort tid till relativt låga kostnader. MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt i samarbete mellan Lunds Universitet-Institutionen för teknisk geologi, Tyréns och avfallsbranschen.

<http://malagageophysics.blogspot.se/>



ÄLDRE DEPONIERERS UTBREDNING

Geoelektriska metoder, resistivitet och inducerad polarisation (IP) kan användas som alternativ till traditionell metoder för att lokalisera äldre deponier och uppskatta deras utbredning. De traditionell fältmetoder som används är framförallt okulära besiktningar. En fördel med de geoelektriska metoderna är att man snabbt kan scanna över stora områden och visualisera sluttäckningars status i 2D och 3D, vilket innebär att metoderna är snabba och kostnadseffektiva. Metoderna har utvecklats mycket under senare år, framförallt när det gäller visualisering i 3D, och för mätningar över tid.



Resistivitetsmätningar i 3D som visar deponins utbredning vertikalt och horisontellt, samt geologin under deponin och sluttäckningens status.

3D-modell av normaliserad IP-data som tydligt visar en deponis utbredning.

Resistivitet och inducerad polarisation (IP) är icke-förstörande geoelektriska metoder som mäter markens varierande elektriska egenskaper genom att ström sänds mellan elektroder vid markytan. Kombination av mätningar med resistivitet och IP har visat sig vara ett starkt verktyg för att lokalisera äldre deponiers utbredning och mäktighet. De materialtyper som bygger upp en deponi har ofta andra geoelektriska egenskaper än de naturliga geologiska material i deponins omgivning och kan därför särskiljas med hjälp av resistivitet och IP.

Mätningarna kan göras på varierande ytor från cirka 1000 m² upp till flera hektar. Mätningar kan utföras både i 2D och i 3D, men de mätningar som utförts i 3D ger i regel en bättre förståelse för deponiers tre dimensionella utbredning. Vid behov kan en inledande storskalig scanning över ett större område med resistivitet eller annan geofysisk metod utföras för att underlätta valet av undersökningsyta.

Resultat av mätningar vid äldre deponier kan till exempel användas för att:

- Lokalisera äldre deponier
- Bestämma äldre deponiers utbredning
- Uppskatta områden med olika materialtyper i en deponi
- Ge underlag för fortsatta undersökningar genom att till exempel ge en bild av var provtagning bör utföras.

MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt med syfte att utveckla undersökningsmetoder baserade på mätningar med geoelektriska metoder. Styrkan med metoderna är att man kan mäta stora områden på kort tid och få information om bland annat strukturer i både två och tre dimensioner på kort tid till relativt låga kostnader. MaLaGa-projektet är ett forskningsprojekt i samarbete mellan Lunds Universitet-Institutionen för teknisk geologi, Tyréns och avfallsbranschen.

<http://malagageophysics.blogspot.se/>

