Rapport SGC 208

Detektering av gas i deponier med resistivitet

©Svenskt Gastekniskt Center – Maj 2009



Håkan Rosqvist, NSR AB Virginie Leroux, NSR AB Torleif Dahlin, LTH Mats Svensson, Tyréns AB Carl-Henrik Månsson, Tyréns AB Magnus Lindsjö, NSR AB

Rapport SGC 208•1102-7371 • ISRN SGC-R-208-SE



SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller 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.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare:

Svenska Gasföreningen, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energikoncernen AB (publ) och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sven Tyréns stiftelse Avfall Sverige Norra Åsbo Renhållnings AB Vetlanda Energi och Teknik AB Nordvästra Skånes Renhållnings AB Statens energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB

mAll Jörgen Held

Innehållsförteckning

1	Intro	oduktion	5		
	1.1	Bakgrund	5		
	1.2	Syfte	6		
	1.3	Arbetshypotes	6		
	1.4	Mål	6		
	1.5	Ytterligare aktiviteter inom projektet	7		
2	Mat	erial och metoder	8		
	2.1	Beskrivning av deponierna där mätningarna utförts.	8		
	2.1.	1 Biocellreaktorn	8		
	2.1.	2 Filbornadeponin	. 11		
	2.1.	3 Hyllstoftadeponin	. 13		
	2.1.4	4 Flishultsdeponin	. 16		
	2.2	Beskrivning av mätmetoder	. 18		
	2.2.	1 Sammanställning samtliga mätningar	. 18		
	2.2.	2 Resistivitet	. 19		
	2.2.	3 Väderstation	. 20		
	2.2.4	4 Metanläckage med laserteknik	. 20		
	2.2.	5 Portryck med BAT-teknik	. 21		
	2.2.	6 Grundvattenobservationer	22		
	2.2.	7 Statisk kammare och TDR (Examensarbete)	. 22		
3	Res	ultat	. 24		
	3.1	Biocellreaktor	. 25		
	3.1.	1 Resultat – Resistivitetsmätningar på biocellreaktor	. 25		
	3.1.2	2 Variabilitet i 3D-modeller från resistivitetsmätningarna	. 27		
	3.1.	3 Korrelation med mätningar av portryck och grundvatten	. 31		
	3.2 Filbornadeponin		. 34		
	3.2.	1 Resultat – Resistivitetsmätningar på Filbornadeponin	. 34		
	3.2.2	2 Variabilitet i 3D-modeller från resistivitetsmätningarna	. 37		
	3.2.	3 Korrelation med metan- och temperaturmätningar på ytan och			
		tryckmätningar på djupet	. 40		
3.3 Hyllstoftadeponin		Hyllstoftadeponin	. 43		
	3.3.	1 Resultat – Resistivitetsmätningar på Hyllstoftadeponin	. 43		
	3.3.	2 Variabilitet i 3D-modeller från resistivitetsmätningarna	. 47		
	3.3.	3 Korrelation med mätningar av temperatur och metanläckage.	. 50		
	3.4	Flishultsdeponin	. 53		
	3.4.	1 Resultat – Resistivitetsmätningar på Flishultsdeponin	. 53		
	3.4.	2 Variabilitet i 3D-modeller från resistivitetsmätningarna	. 56		
	3.4.	3 Korrelation med mätningar av metanläckage och temperatur.	. 59		
4	Disl	cussion	. 61		
5	Slut	Slutsatser och förslag på framtida forskning och utveckling			
6	Refe	Referenser			

Sammanfattning

Projektets huvudsyfte har varit att utveckla en teknik och metodik som baseras på elektriska resistivitetsmätningar för att bättre förstå förekomst och rörelser av gas i deponier. Projektet syftar därmed också till att bättre kunna utnyttja energipotentialen i gasen och att minska föroreningsbelastningen till atmosfären genom att ta fram verktyg för att bättre ta hand om deponigas. Ett ytterligare syfte har varit att bygga upp kunskap för karakterisering av deponiers innandöme. Projektet har även haft syftet att utveckla teknik för att kartlägga sambandet mellan gasrörelser inne i en avfallsdeponi och gasläckage genom deponins täckskikt.

Mätningar utfördes vid fyra deponier; Biocellreaktor (NSR, Helsingborg), Filbornadeponin (NSR, Helsingborg), Hyllstoftadeponin (Nårab, Klippan) och Flishultsdeponin (Vetab, Vetlanda). Mätningarna utfördes som tredimensionella (3D), och repeterades för att analysera förändringar i resistivitet med tiden. Kompletterande mätningar av andra parametrar som till exempel portryck och marktemperatur genomfördes samtidigt som resistivitetsmätningarna pågick.

Resultaten från resistivitetsmätningarna stämmer väl överens med tidigare mätningar vilket gör att resultaten betraktas som tillförlitliga. Mätningarna har visat stora variationer såväl rumsligt som tidsmässigt. Samtliga mätningar har visat störst variabilitet på grunda djup och avtagande variabilitet med djupet. De fyra deponierna har uppvisat olika resistivitets karakteristiska som har kunnat relateras till situationerna på respektive deponi.

Mätningarna visar att resistiviteten kan vara en mycket kraftfull metod för att undersöka processer och inre strukturer i deponier. Kunskap om vatten- och gasrörelser är viktiga vid drift av deponier och båda dessa processer kan detekteras med hjälp av resistivitetsmetoden. Nedbrytning av avfall med högt organiskt innehåll resulterar i processer som medför stor variabilitet i resistivitet.

Mycket snabba förändringar i resistivitet har uppmätts, och förändringarnas hastighet indikerar att de sannolikt till största del beror på ändringar i gastrycket i avfallet. Därmed har det visat sig vara möjligt att detektera gasflöde i deponier, vilket har varit huvudsyftet med detta projekt.

Korrelation med andra parametrar och processer, på djupet och på ytan av deponierna har undersökts. Utöver resistivitet har mätningar utförts av grundvatten (nivåer, konduktivitet och temperatur) portryck, marktemperatur, väderdata (lufttemperatur, nederbörd och lufttryck), fukthalt i markytan samt gasflöde genom täckskikt.

De senaste årens utveckling inom 3D-området gör att resistivitet har blivit ett effektivare verktyg vid drift av deponier. Med 3D-teknik kan såväl inre strukturer som processer detekteras, analyseras och illustreras på ett trovärdigt sätt. Den framtida utvecklingen inom 3D kommer sannolikt att ytterligare utveckla möjligheterna att tillämpa resistivitet för drift och kontroll på deponier.

Det finns ett behov att ytterligare undersöka påverkan på resistivitetsvärden från andra processer i avfall. Viktiga parametrar är till exempel, fukthalt, joninnehåll, portryck och temperatur. Fortsatt forskning och utveckling inom området bör därför utreda dessa parametrars inverkan på avfallets resistivitet, innan färdiga system för kommersiell tillämpning kan göras tillgängliga.

Summary

The main objective with the research project was to develop a methodology to improve the understanding of landfill gas migration in landfills, based on measurements with electrical resistivity. Consequently, the project aimed at an improvement of the utilisation of the energy potential in landfill gas, and to reduce the environmental impact to the atmosphere. Further more, the objective was to improve techniques for investigations of internal structures in landfills. The project also aimed at better understanding of gas migration in the waste body and the mitigation through a landfill cover.

Measurements were performed at four landfills; the Biocell reactor (NSR, Helsingborg), the Filborna landfill (NSR, Helsingborg), the Hyllstofta landfill (Nårab, Klippan) and the Flishult landfill (Vetab, Vetlanda). Three dimensional (3D) measurements and analysis were performed. The measurements were repeated in time in order to study changes with time for the resistivity. Supplementary information was created by measurement of other parameters, such as, groundwater table and soil temperature.

The results from the resistivity measurements agreed with previous measurements performed at landfills, and thus, the results are therefore regarded as reliable. The measurements showed large temporal and spatial variations, and all of the measurements showed the highest variability near the surface.

The results show that the resistivity technique is a powerful tool for investigations of the internal of landfills. Water and gas migration are important features in landfill management and both processes can be detected by using resistivity. Degradation of organic waste results in process with high variability in time and space. Also the degradation rate varies in a landfill and high variability was registered during the resistivity measurements. The high variability in resistivity is likely to be explained by changes in gas pressure and thus indicating gas migration. Therefore, the project has showed that the migration of gas may be detected by measurements of the subsurface resistivity, which was the main objective with the project.

Correlation with other parameters and processes was investigated. In addition to the resistivity measurements, groundwater parameters (level, temperature and electric conductivity), pore pressure, soil temperature, weather data, (air temperature, precipitation, and air pressure), soil moisture content, and gas flow through the soil cover, was monitored.

The development on 3D-measurements over the last years has improved the resistivity technique as an effective tool for landfill management. With the 3D-technique internal structures and processes can be detected and visualised in a powerful way. Future development in 3D-technique and techniques for visualisation will most likely develop the possibilities for better understanding of subsurface processes at landfills.

There is a need for further investigations on resistivity from processes in solid waste landfills. Important features are, for example, soil moisture content, ionic content, pore pressure, and temperature. Future research and development should therefore further investigate the impact of these parameters on the resistivity before the technique can be regarded as fully developed for commercial applications at landfills.

1 Introduktion 1.1 Bakgrund

Projektet har genomförts som ett samarbetsprojekt mellan NSR AB, Teknisk Geologi på Lunds Tekniska Högskola (LTH) och Tyréns AB. Projektledare har varit Håkan Rosqvist (NSR). Övriga deltagare i projektgruppen har varit; Torleif Dahlin (LTH), Mats Svensson (Tyréns), Carl-Henrik Månsson (Tyréns), Virginie Leroux (NSR), Magnus Lindsjö (NSR). Projektet startade i januari 2008 och avslutades i april 2009. Finansiärer har varit; Energimyndigheten via SGC, Sven Tyréns stiftelse, Avfall Sverige, Nårab, Vetab och NSR.

Gasbildning i deponier är ett sedan länge känt fenomen och under senare år har det allt mer uppmärksammats att gasläckage från deponier till atmosfären bidrar till att påskynda de allt snabbare globala klimatförändringarna. I en lokal skala påverkar dessutom gasläckage från deponier närmiljön genom de luktstörningar som avfallsdeponier kan ge upphov till. En viktig process vid drift av deponier är därför att utvinna deponigasen och återvinna den energi som finns i gasen. Idag är det ofta inte lönsamt att använda deponigas som fordonsbränsle, men energiåtervinning i form av elkraft och/eller uppvärmning av hus är vanlig.

Gasuttaget ur deponier sker via vertikala brunnar eller horisontella dräneringsledningar som installeras i deponier. Brunnarna är speciellt konstruerade för att maximera gasuttaget. Avfallets sammansättning är väsentligt för gaspotentialen, men även fukthalt och avfallets placering i deponin spelar stor roll. För att kunna effektivisera gasuttaget, till exempel genom en mer effektiv placering av gasbrunnar, finns det ett behov av information om hur deponin är uppbyggd och om det finns zoner med ansamling av gas eller vatten.

Vid drift av deponier är en optimal placering av uttagsbrunnar av stort intresse med det finns inte någon effektiv metod för att lokalisera gasförekomst i deponier. Praktisk erfarenhet visar att den mängd gas som kan tas ut ur gasbrunnar varierar väldigt mycket och man har ofta svårt att relatera variationerna till några konkreta faktorer. Till exempel kan variationen ofta vara stor mellan varandra närbelägna brunnar, vilket är svårt att förutsäga eller förklara utan kännedom om deponins inre strukturer. Ett skäl som ibland anges är den horisontella skiktning av avfallet som uppstår vid deponering av avfallet. För att kunna maximera gasuttaget behövs det metoder för detektering av gas- och vattenförekomst, så väl som för undersökning av interna strukturer i deponier.

Inledande försök med resistivitetsmätningar, en geofysisk metod som karterar markens elektriska ledningsförmåga, har utförts i samarbete mellan Teknisk geologi på Lunds Tekniska högskola (LTH) och NSR. Resultaten från de inledande försöken har visat att mätningar med geofysisk teknik kan vara möjlig för att detektera gasansamlingar i deponi (Rosqvist et al., 2005 och Rosqvist et al., 2007). Eftersom resultaten i de inledande studierna har indikerat att resistivitets-metoden är en möjlig metod för detektering av gas i deponier har det varit intressant att gå vidare med ett mer storskaligt försök i ett utvecklingsprojekt.

I ett internationellt perspektiv framstår Frankrike som det land där man satsar forskningsresurser på utveckling av geofysiska mätmetoder för tillämpningar på deponier. Forskningen har i första hand syftat till att undersöka vattenförekomst och vattenrörelser i biocellreaktorer. Under senare år har resultat publicerats vid konferenser och i vetenskapliga tidskrifter som visar att resistivitet är en möjlig metod för att detektera vattenförekomst i deponier (t.ex Bouye et al., 2007, Grellier et al., 2005, Rosqvist et al., 2005 och Rosqvist et al., 2007). Mätresultat har även indikerat att gasförekomst i deponier kan detekteras med resistivitet, men man har konstaterat att tekniken behöver utvecklas (Rosqvist et al., 2007).

Ett projekt med syftet att utveckla en teknik för mätning av metanläckage till atmosfären från deponier med hjälp av IR-, och laserteknik har konstaterat att information om deponins inre är väsentlig (Ljungberg et al., 2009). Mätningar med IR-, och laserteknik visar att deponier läcker mycket metan till atmosfären och att information om deponins inre struktur och om gasrörelser i deponin är viktiga. Inom ramen för projektet utfördes mätningar med resistivitet i kombination med lasermätningar. Syftet med dessa mätningar var att översiktligt undersöka möjligheten att följa ett gasflöde under och ovan markytan samtidigt.

1.2 Syfte

Syftet med projektet har varit att utveckla en teknik och en metodik som baseras på resistivitetsmätningar för att bättre förstå förekomst och rörelser av gas och vatten i deponier. Projektet syftar därmed också till att bättre kunna utnyttja energipotentialen i gasen och att minska föroreningsbelastningen till atmosfären. Ett ytterligare syfte är att bygga upp kunskap inom tillämpning av geofysiska mätningar på deponier för karakterisering av deponiers ingående material. Interna strukturer som kan agera som barriärer för vatten och gas är också av intresse, då det påverkar processerna i deponin. Ett ytterligare syfte har varit att kartlägga samband mellan gasrörelser inne i en avfallsdeponi och gasläckage genom deponins täckskikt.

1.3 Arbetshypotes

I detta projekt har en arbetshypotesen för detektering av gas genom mätningar med resistivitet, som är en geoelektrisk metod, tillämpats. Arbetshypotesen bygger på antagandet att den elektriska resistiviteten påverkas av förändringar i gastryck i de öppna porerna i avfallet. Till exempel så leder ett förhöjt gastryck till att vatten trycks ut ur porer vilket leder till en högre resistivitet, eftersom vatten leder elektrisk ström bättre än gas. Enkelt uttryck kan man säga att hög respektive låg resistivitet indikerar gas respektive vatten. Det finns dock flera andra faktorer, utöver vatten- och gasinnehåll, som påverkar resistiviteten i en deponi, till exempel joninnehåll i lakvattnet och temperaturen (Bouye et al., 2007; Grellier et al., 2005).

En ytterligare arbetshypotes i projektet har varit att snabba förändringar av resistivitet beror på gasrörelser i avfallet. Gasrörelserna beror i sin tur i huvudsak på ändrade tryckförhållanden i porsystemet i avfallet.

1.4 Mål

Målsättningen med projektet är att ge svar på, eller bidra till bättre förståelse av följande frågeställningar:

- Går det att detektera deponigas med resistivitets- och/eller IP- mätningar?
- Går det att kvantifiera förekomst av gas i deponier?
- Går det att se interna strukturer, och i så fall med vilken upplösning?
- Går det att detektera vattenförekomst i deponier?
- Kan metoden användas för att karakterisera avfallet?
- Hur mycket referensdata i form av konstruktionsritningar, geoteknisk sondering/borrning är nödvändig som komplement till geofysisk data?

- Hur långa mätserier behöver vi, och vilken upplösning i tid är relevant?
- Räcker 2D mätningar eller behöver vi 3D för att kunna upplösa de heterogena strukturerna i deponin?
- Finns det andra metoder (t.ex. andra geofysiska mätningar eller mätningar på deponins yta av olika slag) som kan komplettera resistivitet?
- Hur presenteras data på ett effektivt sätt?

1.5 Ytterligare aktiviteter inom projektet

Huvudmomentet i projektet har varit att utveckla geofysiska mätmetoder (resistivitet) för att undersöka om tekniken går att utveckla för att kunna användas för att detektera gasrörelser i avfallsdeponier. Inom ramen för projektet har ytterligare ett antal aktiviteter utförts med syfte att inhämta internationell kunskap, och för att sprida den kunskap som har skapats i vårt projekt.

Följande moment, utöver fältmätningar och analyser som redovisas i kapitel 2-4, har utförts inom ramen för projektet:

- <u>Studieresa till Paris</u>: Inom projektet genomfördes en tredagars resa till Paris i april 2008. Vid resan anordnades möten och studiebesök hos internationellt kända forskare och aktörer inom deponiforskning med erfarenhet av geofysiska tillämpningar. De organisationer som vi hade utbyte med var; Sita/Suez, Cemagref och Veolia.
- 2. <u>Examensarbete</u>: Inom ramen för projektet har Sara Johansson genomfört sitt examensarbete (Fysiska institutionen, Lund). Sara har specialstuderat gasflöde genom sluttäckningen och försöker koppla det till gasrörelser i avfallet (Titel på examensarbete: *Electrical resistivity as a tool for analysing soil gas movements & gas emissions from landfill soils*).
- 3. <u>Internationell forskarworkshop</u>: Inom ramen för projektet anordnades en internationell forskarworkshop i Malmö i november 2008. Workshopen samlade 45 deltagare från sex länder. Sammanlagt gavs 18 presentationer i fem sessioner (se www.nsr.se).
- 4. <u>Temanummer i vetenskaplig tidskrift</u>: En idé till att sammanställa ett temanummer framkom vid workshopen i Malmö. I skrivande stund pågår planering av ett tema nummer i tidskriften *Waste and Resources Management* (Tomas Telford). Arbetet med att sätta samman ett temanummer sker i nära samarbete med Professor William Powrie på University of Southampton.
- Presentationer på konferenser: Presentationer av projektet har utförts vid två tillfällen under 2008. Virginie Leroux gav en presentation vid konferensen *Near Surface Geophysics-2008* i Krakow, Polen, september 2008 och Håkan Rosqvist gav en presentation vid konferensen Intercontinental Landfill Research Symposium (ICLRS-2008) i Colorado, USA, september 2008.

2 Material och metoder

2.1 Beskrivning av deponierna där mätningarna utförts.

Mätningar utfördes vid fyra fältlokaler, i) Biocellreaktor (NSR, Helsingborg), Filbornadeponin (NSR, Helsingborg), Hyllstoftadeponin (Nårab, Klippan) och Flishultsdeponin (Vetab, Vetlanda). Val av deponier och bestämning av läge för försöksuppställningarna byggde dels på ett intresse från de tre bolagen att delta i projektet och dels på gemensamma bedömningar av lämpligt läge för mätningarna. Samtliga mätuppställningar för resistivitet var likartade, det vill säga, de uppfördes för mätningar av resistivitet i 3D. Det innebär att försöksuppställningen bygger på mätningar i ett antal parallella linjer med syfte att generera mätdata i en markvolym. I tabell 2.1 (avsnitt 2.2.1) har information om mätuppställningarna sammanfattats. Samtliga fältlokaler placerades på relativt plana områden, några var i princip helt horisontella medan andra låg i områden med svag lutning.

Nedan ges en beskrivning av de fyra mätområdena.

2.1.1 Biocellreaktorn

Mätningarna utfördes den 20 till 25 maj, 2008 på en biocellreaktor som ligger på NSR:s återvinningsanläggning i Helsingborg. Biocellreaktorn anlades 2001 och är cirka 210 meter lång, 60 meter bred och med ett djup på cirka 16 meter. För att skydda biocellreaktorns omgivning från läckage av lakvatten är den isolerad från sin omgivning med ett lager av lera med låg permeabilitet i botten och på sidorna. För att hindra nederbörd att tränga in har en plastliner använts som övertäckning. Biocellreaktorn byggdes av avfall med högt organiskt innehåll, som hade malts och bevattnats innan det lades in i biocellreaktorn. Biocellreaktorn byggdes upp i pallar, där varje pall var cirka 5 meter hög, och där varje pall täcktes med ett lager kompost. Sju år efter det att biocellreaktorn anlades producerar den fortfarande stora volymer deponigas.

I biocellreaktorns yta finns det sju parallella diken, med inbördes avstånd på 20 meter, där horisontella rör för lakvattenåterföring installerats. Det förekom inte någon lakvattenåterföring under försöken som presenteras i denna rapport. Dikena är cirka en meter djupa och innehåller även horisontella rör för uttag av deponigas. Det finns ytterligare ett stort antal horisontella rör för gasuttag på olika nivåer i biocellreaktorn. I botten på biocellreaktorn finns ett system för uppsamling av lakvatten. I samband med resistivitetsmätningarna uppmättes grundvattenytan i biocellreaktorn till cirka 7 meter under markytan på biocellreaktorn. Figur 2.1 visar en principsektion av biocellreaktorn vid mätområdet.



Figur 2.1: Principsektion av biocellreaktorn vid mätområdet.



Figur 2.2: Plan över försöksuppställningen på biocellreaktorn som visat placering av BAT-spetsar och riktning till två grundvattenrör (GV-1 och GV-2).

Figur 2.2 visar försöksuppställningen för resistivitetsmätningar på biocellreaktorn. Mätningarna utfördes i nio parallella linjer som var 20 meter långa och med ett inbördes avstånd på två meter.

Avstånden mellan elektroderna var en meter. Den totala ytan var således 20 gånger 16 meter (320 m²), och var i princip helt horisontell. En container placerades vid sidan av mätområdet där mätutrustning förvarades under mätningarna. Figur 2.3 visar ett foto över mätområdet på biocell-reaktorn.



Figur 2.3: Foto över mätområdet på biocellreaktorn.

2.1.2 Filbornadeponin

Mätningarna utfördes den 18 till 22 augusti 2008 på Filbornadeponin på NSR:s återvinningsanläggning i Helsingborg. Mätområdet låg på ett högt beläget område på Filbornadeponin där kommunalt avfall och industriavfall har deponerats under senare år. Avfallet har deponerats i pallar med en höjd av cirka två meter inom celler som är avgränsade med vallar av kompostmaterial. I området finns ett uppsamlingssystem för gas där vertikala uttagsbrunnar är sammankopplade med täta rör som ligger horisontellt. Som tillfälligt täckskikt på området låg ett cirka 0,5 meter tjockt lager bestående av ett relativt inert material som kommer från en äldre deponi som grävts ut och flyttats till Filbornadeponin. På grund av deponins topografi och att mätområdet var beläget längst upp på deponin förutsätts det att grundvattenytan var belägen på ett djup som var större än penetreringsdjupet vid resistivitetsmätningarna. En borrning gjordes där det konstaterades att det inte fanns grundvatten på drygt 13 meters djup. I figur 2.4 visas en principsektion området på Filbornadeponin där mätningarna utfördes, figur 2.5 visar en plan över området och i figur 2.6 visas ett foto över området.



Figur 2.4: Principsektion av Filbornadeponin vid mätområdet.



Figur 2.5: Plan över mätområdet på Filbornadeponin.



Figur 2.6: Foto över mätområdet på Filbornadeponin.

2.1.3 Hyllstoftadeponin

Mätningarna utfördes den 3 till 7 november 2008 på Hyllstoftadeponin som ligger i Klippans kommun och drivs av Nårab. Området där mätningarna utfördes var placerat på äldre delar av deponin där gasuttag inte längre förekommer. Området är täckt med ett 10 cm lager av lera som tätskikt som överlagras av ett cirka 0,5 meter tjockt komposterat material, med inslag av ett grusigt material. Deponin var täckt av gräs och området där mätningarna utfördes var relativt flackt.

Vid mätområdet finns det inte några kända strukturer i deponins inre som kan ge anomalier i resistivitetsmätningarna. I figur 2.7 visas en principsektion området på Hyllstoftadeponin där mätningarna utfördes och figur 2.8 visar en plan över området.



Figur 2.7: Principsektion av Hyllstoftadeponin vid mätområdet.



Figur 2.8: Plan över mätområdet på Hyllstoftadeponin.

Grundvattennivåer på Hyllstofta lodades den 28 oktober och den 20 november, det vill säga, före och efter resistivitetsmätningarna. Konduktivitet mättes i två av brunnarna närmast undersökningsområdet den 20 november. Grundvattennivån uppmättes till cirka 5 m under markytan (80 m.ö.h.) (Figur 2.9 och 2.10). Konduktiviteten var 2,90 mS/cm i den ena brunnen och 4,09 mS/cm i den andra, vilket är betydligt lägre än den konduktivitet som uppmättes i biocellreaktorn (se kapitel 3.1.3).



Figur 2.9: Grundvattennivåer i brunnar nära Hyllstofta undersökningsområde. Värden tagna före resistivitetsmätning.



Figur 2.10: Grundvattennivåer och konduktivitet I brunnarna närmast Hyllstofta undersökningsområde. Värden tagna efter resistivitetsmätning.

2.1.4 Flishultsdeponin

Mätningarna utfördes den 11 till 15 november 2008 på Flishultsdeponin som ligger i Vetlanda kommun och drivs av Vetab. Mätområdet låg i ett område där både kommunalt avfall och industriavfall har deponerats. Deponin är delvis täckt av restprodukter från glasindustri och ställvis är restprodukterna från glasindustrin blandade med ett inert fyllnadsmaterial. Under tiden som resistivitetsmätningarna pågick sattes systemet för gasuttag igång efter en längre tids avstängning. Vid mätningarna fanns det stora vattensamlingar i området där mätningarna utfördes. Grundvattennivån i deponin är inte känd.

Den 18 december grävdes tre provgropar på försöksområdet på Flishultsdeponin för att undersöka överensstämmelse med resistivitetsmätningarna. De tre provgroparna placerades över mätområdet baserat på resultaten från resistivitetsmätningarna. I figur 2.11 visas en principsektion området på Flishultsdeponin där mätningarna utfördes, figur 2.12 visar en plan över området och i figur 2.13 visas ett foto över området.



Figur 2.11: Principsektion av Flishultsdeponin vid mätområdet.



Figur 2.12: Mätområdet vid Flishultsdeponin (vänster).

Figur 2.13: Foto över mätområdet på Flishultsdeponin (höger).

2.2 Beskrivning av mätmetoder

2.2.1 Sammanställning samtliga mätningar

I projektet har ett stort antal mätningar utförts, både på djupet i deponierna och på ytan. I tabell 2.1 visas en sammanställning av samtliga mätningar som utförts på de fyra deponierna.

Metod	Biocellreaktorn	Filborna- deponin	Hyllstofta- deponin	Flishults- deponin
	(NSR)	(NSR)	(Nårab)	(Vetab)
Resistivitet:				
Antal linjer	9	9	6	6
Elektrodavstånd (m)	1	1	1	2
Längd (m)	20	20	31	62
Bredd (m)	16	16	10	20
Mätperiod	20/5 - 25/5	15/8 - 3/9	3/11 - 7/11	11/11 - 15/11
Väderstation:				
Lufttemp.	Ja	Ja	Ja	Ja
Marktemp.	Ja	Ja	Ja	Ja
Nederbörd	Ja	Ja	Ja	Ja
Lufttryck	Ja	Ja	Ja	Ja
Positionering	In	Ia	Ia	In
(GPS)	Ja	Ja	Ja	Jä
Insamling av anläggningsinformation	Ja	Ja	Ja	Ja
Metanmätning (Laser)	Nej	Ja	Ja	Ja
Grundvatten- observationer	Ja	Nej	Ja	Nej
Portryck	Io	Io	Nai	Nai
(BAT)	Ja	Ja	nej	INCJ
Fukthalt i mark	Nai	Io	Nai	Nai
(TDR-teknik, exjobb)	1103	Ja	INCJ	1103
Gasflöde				
(Statisk kammare – exjobb)	Nej	Ja	Nej	Nej

Tabell 2.1. Sammanställning av samtliga mätningar som utförts på de fyra deponierna.

2.2.2 Resistivitet

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 2.14). 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 2.14: Princip för resistivitetsmätning: en kontrollerad ström sänds mellan två elektroder samtidigt som spänningen mäts mellan två andra elektroder (efter Robinson och Coruh 1988).

Mätningarna av markens resistivitet utfördes med hjälp av ABEM Lund Imaging System (Dahlin, 1996), som i detta fall bestod av resistivitetsinstrumentet Terraohm RIP924B, Booster SAS2000, 3 st Electrode Selector ES10-64C, ett antal elektrodkablar samt diverse kopplingsanordningar. Utrustningen medger mätning i sju kanaler simultant, vilket effektiviserar datainsamlingen i fält. Vid mätningarna användes multielektrodkablar med sammanlagt 192 elektroder anslutna vilka var utplacerade längs 6 eller 9 linjer. Datainsamlingen var helt automatiserad och styrdes av en dator som gjorde upprepade mätningar 12 gånger per dygn. Varje natt skickades data automatiskt till en server i Lund för bearbetning och tolkning.

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

Data tolkades med hjälp av inversion (invers numerisk modelltolkning) i programvaran Res3dinv version 2.16.40 (Geotomo Software 2008). Tolkningen bygger på en tredimensionell modell av marken. Resultatet av modelltolkningen visas i form av sektioner av resistivitetens variation mot djupet, i horisontella snitt på olika djup samt volymsmodeller. Eftersom upprepade mätningar utfördes analyseras variationen i resistivitet mellan mättillfällena. 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.

2.2.3 Väderstation

Parallellt med resistivitetsmätningarna mättes och registrerades väderdata med en portabel väderstation. Mätningarna utfördes en gång per minut. Figur 2.15 visar försöksuppställningen för mätning av väderdata. De parametrar som mättes och typ av mätutrustning var:

- 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)
- Vindriktning (Wind Sonic, mäter 1 m över mark)
- Vindhastighet (Wind Sonic, mäter 1 m över mark)

Loggern var är placerad i containern som fanns vid mätområdena och mätinstrumenten var uppställda två till tre meter därifrån. Närheten till containern gör att mätningen av vinddata ibland kan vara missvisande då instrumenten kunde stå i lä från containern. Mätningen av marktemperatur sker i skuggad jord och lufttemperaturen mäts i ett därför avsett rör som skuggar mätsonden.

Till loggern fanns det även möjlighet att ansluta laserinstrumentet vilket gjordes vid tre tillfällen under mätningar på Filbornadeponin. Delar av resultaten från mätningar av väderdata redovisas i samband med varje försöksuppställning nedan.



Figur 2.15: Försöksuppställning för mätning och registrering av väderdata.

2.2.4 Metanläckage med laserteknik

I projektet användes ett handburet Siemens AG, CT PS 8 lasersystem utvecklat för fältmässig fjärrdetektering av gasemission från naturgas inom ramen för VOGUE-projektet, *Visualisation of Gas for the Utilities and the Environment* (VOGUE 2004).

Siemens lasersystem, som är ett så kallat backscatter system, arbetar med en infraröd laser (1651 nm) där laserstrålen sänds ut och återreflekterats från en bakgrundsyta, och registrerar på så sätt koncentrationen av metangas utmed laserstrålens strålgång. 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 är stationärt riktat mot samma utsläppspunkt under en längre tid för att åskådliggöra tidsmässigs skillnader i metanflöde (Figur 2.16).



Figur 2.16: Långtidsmätning med laserinstrumentet

2.2.5 Portryck med BAT-teknik

Portrycksmätning gjordes med ett BAT portryckssystem (www.bat-gms.com). Det består av en filterspets som är kopplad till ett entums förlängningsrör, en BAT IS Sensor som placeras inuti röret och en BAT IS Fältenhet. Fältenheten lagrar data, men mäter också det atmosfäriska trycket. Filterspetsen var av typen MKIII Vadose, som är designad för mätning i omättad jord. För att förhindra störningar i resistivitetsmätningen användes plaströr.

Innan filterspetsen installerades i deponierna förborrades ett hål i deponin. För att täta hålrummet runt röret användes bentonit som packades runt röret. Två filterspetsar med tillhörande sensorer installerades vid varje mätområde (Biocellreaktorn och Filbornadeponin) ungefär en vecka efter resistivitetsmätningarna startade. På biocellreaktorn var installationsdjupet 1,2 m under markytan och på Filbornadeponin 1,5 m under markytan. Båda undersökningsområdena ligger väl över grundvattenytan. Atmosfäriskt tryck mättes samtidigt och användes för att kompensera mätvärdena för vädervariationer.

Mätningarna på biocellreaktorn utfördes 2008-05-29 till 2008-06-24. Mätningarna på Filbornadeponin utfördes 2008-08-22 till 2008-09-03. Portrycket mättes inte på Hyllstofta eller Flishult.

2.2.6 Grundvattenobservationer

I biocellreaktorns grundvatten mättes nivåer, temperatur och elektrisk konduktivitet med hjälp av CTD-divers (Van Essen Instruments). Vid Hyllstoftadeponin mättes grundvattennivåer och elektrisk konduktivitet med en mätsond (DI263) med ett maximalt installationsdjup på 30 m under grundvattenytan.

CTD-divers installerades i två grundvattenrör i närheten av undersökningsområdet för resistivitet (Figur 2.2). Mätningarna startade den 21 maj och varade till den 24 juni. Totaltrycket registrerades varje halvtimme och lagrades i instrumentet. Samtidigt mättes atmosfärstrycket för att kompensera för förändringar i grundvattennivån beroende på väderomslag. Manuella mätningar av grundvattennivån med lod gjordes vid två tillfällen. Dessa användes sedan för att relatera trycket till en viss grundvattennivå och på så sätt räkna ut grundvattennivån över hela perioden.

2.2.7 Statisk kammare och TDR (Examensarbete)

Sara Johansson genomfört sitt examensarbete inom ramen för projektet (Fysiska institutionen, Lund). Sara har specialstuderat gasflöde genom sluttäckningen och försöker koppla det till gasrörelser i avfallet. I denna rapport presenteras inte några resultat från examensarbetet, intresserade hänvisas till examensarbetet med titeln *Electrical resistivity as a tool for analysing soil gas movements & gas emissions from landfill soils*.

Statisk kammare

Metanflöden från markytan mättes med statisk kammare under två veckor (4 till 18 augusti 2008) på Filbornadeponin. Under båda veckor användes sex fasta mätpunkter, varav tre placerades på ytligt relativt högresistiva områden och övriga tre på lågresistiva områden. Utrustningen bestod av vanliga spannar med en septumförseglad öppning, varur luftprov togs tre gånger under den 20minutersperiod som varje mättillfälle pågick. Luftproverna togs med syringesprutor och samlades i glasvialer för att vid ett senare tillfälle analyseras i en gaskromatograf. Kamrarna förseglades under mätningarna till markytan med våt lera för att förhindra gasläckage.



Figur 2.17: Provtagning med statisk kammare på Filbornadeponin.

Koncentrationen av metan i varje luftprov analyserades i en gaskromatograf med en FID-detektor där de olika ämnena i gasen separerades i gaskromatografens kolonn och förbrändes i FIDdetektorns vätelåga. Förbränningen resulterar i en spänningstopp, vars storlek används för att räkna ut koncentrationen av ämnet i gasprovet. Den linjära ökningen av metankoncentration i de tre luftprover som tagits vid varje mättillfälle används sedan för att beräkna metanflödet från markytan.

TDR-mätningar

Markfuktigheten mättes i tolv TDR-prober, jämt fördelade över en större del av undersökningsytan på Filbornadeponin. Mätningarna utfördes mellan den 4 och 7 juli samt den 18 och 22 augusti. Proberna var 30 centimeter långa, och var kopplade till en multiplexer via kablar. Multiplexern var kopplad till ett TDR100-instrument, och båda var manuellt styrda via en dator. Vid mättillfällena sändes ström ut till en av proberna, och en vågform skickades tillbaka från proben till datorn. Våglängden på vågformerna är beroende av jordens dielektriska konstant, vilken i sin tur är kopplad till markfuktigheten. Topps ekvation är en empirisk formel som beskriver sambandet mellan dielektrisk konstant och markfuktigheten. Denna formel användes till att beräkna fuktvärdena, efter att proberna hade blivit kalibrerade.

3 Resultat

Nedan presenteras resultaten för respektive mätområde (Biocellreaktorn, Filbornadeponin, Hyllstoftadeponin och Flishultsdeponin). Mätningarna redovisas för respektive område i avsnitt 3.1 till 4.4, och i tabell 3.1 finns en sammanställning av vilka typer av mätningar och vilka analyser som redovisas i resultatkapitlet.

	Biocell- reaktorn	Filborna- deponin	Hyllstofta- deponin	Flishults- deponin
1. Resistivitetsmätningar	Ja	Ja	Ja	Ja
2. Variabilitet i resistivitetsdata	Ja	Ja	Ja	Ja
3. Portryck i deponin	Ja	Ja		
4. Grundvattennivåer och temperatur	Ja		Ja	
5. Metanmätningar på ytan		Ja	Ja	Ja
6. Temperatur i luft och mark		Ja	Ja	Ja
7. Temperatur i mark (systematiska mätningar)			Ja	

Tabell 3.1: Mätningar och analyser för respektive mätområde, som redovisas i resultatkapitlet.

Resistivitetsmätningar har utförts vid samtliga deponier, och analys av variabilitet i resistivitetsdata har gjorts för samtliga mätområden. Portryck mättes i biocellreaktorn och Filbornadeponin i två punkter i respektive deponi. Grundvattennivåer och temperatur samt konduktivitet mättes i grundvattnet i två punkter på biocellreaktorn. Grundvattennivåer mättes vid Hyllstoftadeponin. Metanläckage genom täckskiktet mättes på Filborna-, Hyllstofta- och Flishultsdeponin. Eftersom biocellreaktorn är täckt med en plastliner ger inte metanläckagemätningar information om gasflöden annat än genom håligheter i plastlinern. Temperatur i luft och mark mättes vid Filborna-, Hyllstoftaoch Flishultsdeponin, och vid Hyllstoftadeponin genomfördes en systematisk temperaturmätning i marken över hela mätområdet. För mer detaljerad information om mätningarna se tabell 2.1.

3.1 Biocellreaktor



3.1.1 Resultat – Resistivitetsmätningar på biocellreaktor

Figur 3.1: Vertikala sektioner från 3D-modell från resistivitetsmätningarna på biocellreaktorn den 20 maj, 2008.

I figur 3.1 och 3.2 visas resultat av resistivitetsmätningarna på biocellreaktorn som utfördes den 20 maj mellan klockan 09.30 och 11.30. Figurerna visar utvalda tvärsnitt respektive en volymsbild av modellen från mätningarna. Försökuppställningen på biocellreaktorn bestod av 9 parallella linjer med en längd av 20 meter och med två meters avstånd mellan linjerna. I figurerna framgår det att resistiviteten i biocellreaktorn var relativt låg, till största del under10 Ω m (gröna och blå områden). Skälen till att resistivitetsvärdena är låga i biocellreaktorn beror sannolikt på den höga halten av organiskt material, den relativt höga vattenhalten och högt joninnehåll i vattnet.

I området där diket för lakvattenåterföring sträcker sig syns tydligt en förhöjd resistivitet som röda och gula områden (se även figur 2.1). Vid tidigare resistivitetsmätningar på biocellreaktorn har dessa diken också gett tydliga anomalier på samma sätt (Rosqvist et al., 2005 och Rosqvist et al., 2007).

Utöver diket finns det två områden med förhöjd resistivitet, dels strax till vänster om diket och dels i ett område till höger om diket, vid koordinaterna x = 14-15 meter. Dessa två områden med förhöjd resistivitet sträcker sig till cirka två meters djup. Det finns inga kända avvikelser i material eller strukturer i dessa områden och därmed finns det inte någon tydlig strukturell förklaring till de höga resistivitetsvärden som mätts upp i dessa två områden.



Figur 3.2: 3D-modell från resistivitetsmätningarna på biocellreaktorn den 20 maj, 2008.

Biocellreaktor



Figur 3.3: Medelvärdet på resistivitetvärden för 17 horisontella lager i biocellreaktorn.

I figur 3.3 visas medelvärde på resistivitet för 17 horisontella utvärderingslager i biocellreaktorn, från ytan ned till nästan 14 meters djup. Medelvärdet representerar samtliga mätningar för respektive lager under hela mätperioden (20 till 25 maj).

Generellt uppvisas låga medelvärden för resistiviteten i biocellreaktorn, där de ytligaste lagren uppvisar högst resistivitet på knappt 20 Ω m. Från cirka en meters djup minskar resistiviteten med djupet, från knappt 20 Ω m ned till under 5 Ω m på cirka sju meters djup. På djup större än sju meter är det uppskattade medelvärdet på resistiviteten i princip konstant. Grundvattenytan uppmättes till cirka sju meter under markytan, vilket kan antas vara bidragande till den låga och stabila resistiviteten på större djup.

3.1.2 Variabilitet i 3D-modeller från resistivitetsmätningarna

Mätningarna som utfördes på biocellreaktorn pågick från den 20 till den 25 maj med tolv mätomgångar per dygn, vilket resulterade i stora mängder mätdata. 3D-volymen representerar sammanlagt 10880 modellceller som är fördelade i ett nätverk som är 20 x 16 x 13,5 meter. Det stora dataunderlaget ger en god möjlighet att behandla materialet statistiskt, bland annat för att undersöka variabiliteten i mätningarna. Variabiliteten är intressant eftersom hög variabilitet indikerar snabba förändringar i resistivitet vilket sannolikt kan kopplas till förändringar i gastryck och därmed till gasrörelser. Genom att beräkna variationskoefficienten för varje mätpunkt (cell) har variabiliteten i datamaterialet analyserats.



Figur 3.4: Variationskoefficienten för samtliga modellceller för resistivitetsmätningar på biocellreaktorn under perioden 20 till 25 maj, 2008.

Variationskoefficienten för de flesta celler är låg, upp till cirka 0,2, medan några områden uppvisar höga variationskoefficienter, i vissa fall upp till 2,7. De höga variationskoefficienterna återfinns i ytnära områden, vilket också framgår av diagrammet i figur 3.5. I figur 3.4 framgår det att relativt höga variationskoefficienter finns i vissa avgränsade områden. Dels i områden nära diket där de horisontella rören för gasuttag och vattenspridning finns, och där hög resistivitet uppmättes. Även ett område beläget i den högra kanten av mätområdet uppvisade hög variabilitet.

Biocellreaktor



Figur 3.5: Variationskoefficienternas förändring med djupet för resistivitetsdata från biocellreaktorn under perioden 20 till 25 maj, 2008

För att undersöka tidsmässig och rumslig variabilitet i datamaterialet har variationskoefficienten beräknats, dels för tidsserier och dels för de olika lagren. Först beräknades variationskoefficienten för varje mätcell under hela mätperioden. Därefter beräknades variationskoefficienten för varje lager på de enskilda cellernas variationskoefficient.

I de ytliga lagren uppvisar datamaterialet en hög variationskoefficient, med ett toppvärde för lager 3, som representerar cirka 1 meters djup. Därefter sjunker variationskoefficienten med djupet, från toppvärdet på nästan 1,8 (ca 1 meters djup) till cirka 0,2 på 5 meters djup. Därefter är variationskoefficienten stabil ner till det djupaste lagret på 14 meters djup där variationskoefficienten stiger till 0,5. Det djupast belägna lagret kan eventuellt representera botten på biocellreaktorn.

För att undersöka om det finns en korrelation mellan hög resistivitet och hög variabilitet i datamaterialet har resistivitet och variationskoefficienten plottats i samma 2D-plan (Figur 3.6). De sex planen representerar sex lager på olika nivåer. När dessa båda parametrar betraktas i samma figur framträder ett mönster som visar att hög resistivitet har en relativt god överensstämmelse med hög variationskoefficient. I området där diket sträcker sig och i området i högra kanten finns zoner där hög resistivitet och hög variationskoefficient sammanfaller.



Figur 3.6: Horisontella plan på olika djup som visar resistivitetsvärden och variationskoefficienter för lager på sex olika djup, från mätningar på biocellreaktorn under perioden 20 till 25 maj, 2008.

3.1.3 Korrelation med mätningar av portryck och grundvatten

3.1.3.1 Portrycksmätningar

Portrycksmätningarna utfördes med BAT-utrustning i två punkter i biocellreaktorn under cirka en månads tid (29 maj till 24 juni, 2008). Tidiga resultat från resistivitetsmätningarna utnyttjades för att bestämma läget för provpunkterna där portrycket skulle mätas. En punkt, sensor 1, placerades i ett område med hög resistivitet och den andra, sensor 2, i ett område med låg resistivitet (Figur 3.7). Läget för portrycksmätningarna framgår av figur 2.2. Sensor 1, placerades vid diket där ett rör för gasuttag är placerat. I figur 3.7 framgår det att mätningarna visar ett undertryck på drygt en meter vattenpelare som sannolikt beror på det undertryck som skapas med uttagssystemet för deponigas. Inledningsvis visade sensor 2 ett övertryck på drygt 3 meter vattenpelare. Efterhand som mätningarna pågick minskade övertrycket till cirka 1,5 meter vattenpelare efter en månad. Avklingning av portrycket över tid kan bero på att gasen läcker ut genom bentonittätningen i hålet där mätproben anbringas. Förändringen av portryck kan också bero på att gastrycket minskar under mätperioden.



Figur 3.7: Portrycksmätning med BAT-utrustning på biocellreaktorn 29 maj till 24 juni, 2008.

3.1.3.2 Grundvatten – nivåer, temperaturer och konduktivitet

Mätningar av nivåer, temperatur och konduktivitet utfördes i två grundvattenrör som var placerade på biocellreaktorn 20 respektive 70 meter från mätområdet (Figur 3.8). Grundvattennivån återfinns på cirka 6,5 m under marknivå i det första grundvattenröret (GV-1) och på cirka 8 m under marknivå i det andra grundvattenröret (GV-2). Inga större fluktuationer registrerades under mätperioden (Figur 3.8).



Figur 3.8. Grundvattennivåer i GV-1 och GV-2, nära undersökningsområdet på Biocellreaktorn.

Temperatur och konduktivitet mättes kontinuerligt i båda grundvattenrören (Figur 3.9). En temperaturskillnad på nästan åtta grader uppmättes i de två grundvattenrören. I GV-1 låg temperaturen kring 45 °C och i GV-2 på drygt 37 °C. En möjlig förklaring är att GV-1 sitter i ett område med högre biologisk aktivitet, och därmed en högre temperatur.

Skillnaden i konduktivitet påminner om skillnaden för temperatur på så sätt att konduktiviteten i GV-1 är avsevärt högre (48 mS/cm) än GV-2 (32 mS/cm). Även i detta fall kan den biologiska aktiviteten och avfallets sammansättning vara möjliga förklaringar till den relativt stora skillnaden.



Figur 3.9: Grundvattnets temperatur och konduktivitet i GV-1 och GV-2 på Biocellreaktorn.

3.2 Filbornadeponin



3.2.1 Resultat – Resistivitetsmätningar på Filbornadeponin

Figur 3.10: Vertikala sektioner från 3D-modell från resistivitetsmätningarna på Filbornadeponin den 18 augusti, 2008.

I figur 3.10 och 3.11 visas resultat från mätningarna som utfördes på Filbornadeponin den 18 augusti mellan klockan 10.00 och 12.00. Figurerna visar utvalda tvärsnitt respektive en volyms-

bild av 3D-modellen från mätningarna. Försökuppställningen på Filbornadeponin är likadan som den på biocellreaktorn med nio parallella linjer med en längd av 20 meter och med två meters avstånd mellan linjerna.

Tre huvudområden kan observeras i figur 3.10 och 3.11. Ett område till höger med låg resistivitet (under 10 Ω m), som stämmer väl överens med kompostvallens läge (se även figur 2.4), och ett större område med högre resistivitet (upp till 60 Ω m) till vänster om kompostvallen och som representerar det område där avfallet finns. Det tredje området, med mycket hög resistivitet, sträcker sig ovanför kompostvallens. I detta område uppmättes resistivitet repå fler hundra Ω m, vilket är speciellt intressant eftersom det kan tolkas som förhöjd resistivitet till följd av gasrörelser vid kompostvallen.

I den ytligaste delen av modellen kan man notera att elektrodernas positioner framträder som högresistiva punkter. Detta är en artefakt som uppstår i den numeriska inversmodelleringen, och som troligen skulle kunna reduceras genom optimering av programinställningar eller programkod.

I figur 3.12 illustreras kompostvallens påverkan på resistivitetsmätningarna genom att utnyttja en så kallad *iso-surface*, som representerar den yta där 16 Ω m har blivit uppmätt. Man kan på så sätt låta 16 Ω m ytan symbolisera den ungefärliga avgränsningen mellan kompostvall och avfall.







Figur 3.12: Tolkad resistivitet från mätningar på Filbornadeponin den 18 augusti där 16 Ω m isosurface symbolisera avgränsningen mellan kompostvall och avfall.



Figur 3.13: Medelvärdet på resistivitetvärden för 17 horisontella lager i Filbornadeponin

I figur 3.13 visas medelvärde på resistivitet för 17 horisontella lager i Filbornadeponin, från ytan till nästan 14 meters djup. Medelvärdet representerar samtliga mätningar i respektive lager under hela mätperioden (18 till 22 augusti).

Vid ytan uppvisas ett relativt högt medelvärde för resistiviteten (över 50 Ω m). De höga värdena i de ytliga lagen kan bero på den tunna täckningen som bestod av ett relativt inert material, sannolikt med hög resistivitet. Därefter minskar resistiviteten snabbt med djupet ned till cirka en meters djup där medelvärdet på resistiviteten stabiliseras kring 20 Ω m. På djup över två meter stabiliseras medelvärdet för resistiviteten på cirka 25 Ω m.

3.2.2 Variabilitet i 3D-modeller från resistivitetsmätningarna

Mätningarna utfördes på Filbornadeponin pågick från den 18 till den 22 augusti med tolv mätomgångar per dygn, vilket resulterade i mycket stora mängder mätdata. Genom att beräkna variationskoefficienten har variabiliteten i datamaterialet undersökts på samma sätt som beskrivs i avsnitt 3.1.2.



NSR2 18th-22nd August 2008

Figur 3.14: Variationskoefficienten för samtliga mätpunkter (celler) för resistivitetsmätningar på Filbornadeponin under perioden 18 till 22 augusti, 2008.

Variationskoefficienterna för resistivitetsmätningarna på Filbornadeponin ligger mellan cirka 0,01 och 0,95. Ytliga områden med större variabilitet syns dels vid området ovanför kompostvallen och i mindre områden till vänster i figur 3.14. De höga variationskoefficienterna som återfinns i ytnära områden framgår också av diagrammet i figur 3.15. Områden med hög variabilitet indikerar stora variationer i resistivitet, vilket kan bero på gasrörelser i avfallet, men även temperaturvariationer kan ge upphov till förändringar i resistivitet.

Filbornadeponin



Figur 3.15: Variationskoefficienternas förändring med djupet för resistivitetsdata från Filbornadeponin under perioden 11 till 18 augusti, 2008.

För att undersöka tidsmässig och rumslig variabilitet i datamaterialet har variationskoefficienten beräknats, på samma sätt som beskrivs i avsnitt 3.1.2.

I de ytliga lagren uppvisar datamaterialet en relativt hög variationskoefficient, med ett toppvärde för lager 4 (cirka 0,9), vilket representerar cirka en meters djup (Figur 3.15). Därefter sjunker variationskoefficienten med djupet ned till 12 meter djup där variationskoefficienten är cirka 0,25. Längst ned, på cirka 14 meters djup, stiger variationskoefficienten till över 0,5.

I figur 3.16 har korrelationen mellan hög resistivitet och hög variabilitet plottats i horisontella plan som representerar sex lager på relativt ytliga nivåer. När dessa båda parametrar betraktas i samma figur framgår det att området vid kompostvallen uppvisar både hög resistivitet och hög variabilitet i ytan och på djupet, vilket kan indikera gasrörelser vid kompostvallen. Även ett område till vänster (vid x-koordinaterna cirka 2-8 och y-koordinaterna cirka 8-12) är intressant på grund av hög variationskoefficient. I detta område syns såväl hög, som låg resistivitet, vilket kopplat till hög variabilitet indikerar snabba förändringar i resistivitet.



Figur 3.16: Horisontella plan som visar resistivitetsvärden och variationskoefficienter för lager på sex olika djup, från mätningar på Filbornadeponin under perioden 11 till 18 augusti, 2008.

3.2.3 Korrelation med metan- och temperaturmätningar på ytan och tryckmätningar på djupet

3.2.3.1 Metanmätningar på ytan

I figur 3.17 visas metanhalter som uppmättes med laserinstrumentet vid fem tillfällen under mätperioden. Områdena med metanläckage återfanns vid samtliga mätningar, dock med lite varierande halter. Mätningarna visar att det fanns ett område ovanför kompostvallen där gasläckage genom täckskiktet sker. Inom detta område har koncentrationer mellan 200 och 6000 ppm uppmätts. Mätningarna visar även ett område med ett lägre läckage (70-100 ppm).



Figur 3.17: Resultat av mätningar av metanläckage genom täckskiktet med laserinstrument på mätområdet på Filbornadeponin.

Långtidsmätningar av metanläckage utfördes i en och samma punkt vid tre tillfällen under fem dagar, den 29 augusti till 3 september, 2008 (Figur 3.18). Mätningar visade att läckage sker med mycket stor variation, från knappt 200 till nästan 1200 ppm.





3.2.3.2 Temperaturmätningar på ytan

I figur 3.19 visas resultaten av temperaturmätningar på Filbornadeponin under perioden 15 augusti till 3 september. Under perioden 26 till 29 augusti var dock temperaturmätningarna ur funktion. De dagliga temperatursvängningarna framgår av figur 3.19 där det också framgår att det finns en hög korrelation mellan marktemperatur och lufttemperatur. Som väntat är temperaturen i marken mer stabil än den i luften.



Figur 3.19: Temperaturmätningar på Filbornadeponin under perioden 15 augusti till 3 september.

3.2.3.3 Portrycksmätningar

Portrycksmätningarna utfördes med BAT-utrustning vid två punkter i Filbornadeponin under cirka två veckor (22 augusti till 3 september, 2008). Tidiga resultat från resistivitetsmätningarna utnyttjades för att bestämma läget för provpunkterna där portrycket skulle mätas. En punkt, sensor 1, placerades i ett område med hög resistivitet och den andra, sensor 2, i ett område med låg resistivitet, resultatet visas i figur 3.20. Läget för portrycksmätningarna framgår av figur 2.5.

Sensor 1, som placerades i ett område med hög resistivitet, uppvisar ett högt positivt portryck på som mest strax över 7 meter vattenpelare i början av mätperioden (Figur 3.20). Det högsta portrycket visas i början av mätperioden, därefter sjunker trycket under hela perioden och mot slutet (efter cirka 12 dagar) är trycket cirka 3,5 meter vattenpelare. Eftersom det inte finns grundvatten på det djup där sensorn var placerad (1,5 meter under markytan) är en trolig förklaring till det höga portrycket ett övertryck på grund av gasbildning. Avklingning av portrycket över tid liknar det som påvisades i sensor 2 på biocellreaktorn. Avklingningen kan bero på att gasen läcker ut genom tätningen av bentonit runt röret när trycket är tillräckligt högt. Det skulle också kunna bero på förändringar i gastryck under mätperioden. Figur 3.20 visar också att sensor 2, som är placerad i ett område med låg resistivitet, har värden nära 0 meter vattenpelare. I detta område har alltså inte några mätbara över- eller undertryck registrerats under mätperioden.



Figur 3.20: Portrycksmätning med BAT-utrustning på Filbornadeponin 2008-08-22 till 2008-09-03.

3.3 Hyllstoftadeponin



3.3.1 Resultat – Resistivitetsmätningar på Hyllstoftadeponin

Figur 3.21: Vertikala sektioner från 3D-modell från resistivitetsmätningarna på Hyllstoftadeponin den 3 november, 2008.

I figur 3.21 och 3.22 visas resultat från mätningarna som utfördes på Hyllstoftadeponin den 3 november mellan klockan 09.20 och 11.20. Figurerna visar utvalda tvärsnitt respektive en volymsbild av 3D-modellen från mätningarna. Försökuppställningen på Hyllstofta bestod av sex parallella linjer med en meters avstånd mellan linjerna. Linjernas längd var 31 meter och elektrodavståndet en meter.

Ytligt uppmättes relativt höga resistiviteter, på vissa ställen över 400 Ω m. Omedelbart under det ytliga lagret (under cirka en meters djup) uppmättes mycket låga resistiviteter, ned till omkring 1 Ω m. Provgropar i området visade att skiktet med hög resistivitet bestod av ett skikt med kompost och ett grusskikt (se även figur 2.7). Nästa lager med låg resistivitet bestod av avfall med ett högt innehåll av aska, där även höga metallhalter uppmättes. Information om materialet i deponin samlades genom grävanda av provgropar och analyser av metallhalter i ett antal jordprov från olika djup. Det finns "luckor" med lägre resistivitet i det översta lagret, som också syns tydligt i 3D-illustrationerna (Figur 3.21 och 3.22). "Luckan" i övre högra delen av bilden beror troligtvis på att där har grävts en provgrop tidigare. Massorna visade sig vara omblandade och avfall/aska hittades redan på cirka 20 cm djup. I de tredimensionella illustrationerna syns även de ytliga delarna med hög resistivitet och "luckorna" i det ytliga lagret med lägre resistivitet. I den nedre bilden i figur 3.22 har en *iso-surface* som motsvarar 16 Ω m lagts in för att tydligt illustrera "luckornas" utbredning.

På större djup, större än cirka 5 meter, uppmättes resistiviteter på cirka 15 till 60 Ωm.



Figur 3.22: 3D-modell från resistivitetsmätningarna på Hyllstoftadeponin den 3 november, 2008. För att illustrera "luckorna" i deponins täckning har en iso-surface lagts in som representerar 16 Ω m ytan (undre bilden).



Figur 3.23: Medelvärdet på resistivitetvärden för 17 horisontella lager i Hyllstoftadeponin.

I figur 3.23 visas medelvärde på resistivitet för 17 horisontella lager i Hyllstoftadeponin, från ytan till nästan 14 meters djup. Medelvärdet representerar samtliga mätningar i respektive lager under hela mätperioden (3 till 7 november).

Vid ytan uppvisas relativt högt medelvärde för resistiviteten (över 90 Ω m). De höga värden i de ytliga lagen beror på den relativt torra (dränerade) täckningen som bestod av cirka 0,5 meter kompost med inslag av grus. Under ytlagret minskar resistiviteten snabbt med djupet ned till cirka en meters djup där medelvärdet på resistiviteten är mycket lågt, under 5 Ω m. På större djup, tre till sex meter, stiger resistiviteten, för att stabiliseras på 40 Ω m på djup över sex meter. Läget för grundvattenytan uppskattas till cirka fem meter under markytan, vilket sannolikt bidrar till den stabila resistiviteten på djup under fem till sex meter.

3.3.2 Variabilitet i 3D-modeller från resistivitetsmätningarna

Mätningarna som utfördes på Hyllstoftadeponin pågick från den 3 till 7 november med tolv mätomgångar per dygn, vilket resulterade i mycket stora mängder mätdata. Genom att beräkna variationskoefficienten har variabiliteten i datamaterialet undersökts på samma sätt som beskrivs i avsnitt 3.1.2.



Figur 3.24: Variationskoefficienten för samtliga modellceller från resistivitetsmätningar på Hyllstoftadeponin under perioden 3 till 7 november, 2008.

Det finns några spridda områden inom mätområdet på Hyllstoftadeponin som visar relativt höga variationskoefficienter (Figur 3.24). Ett stråk syns relativt centrerat tvärs genom mätområdet och ett i högra kanten. Det centrala området stämmer överens med området där förhöjd temperatur har uppmätts (Figur 3.27).

Hyllstoftadeponin



Figur 3.25: Variationskoefficienternas förändring med djupet för resistivitetsdata från Hyllstoftadeponin under perioden 3 till 7 november, 2008.

För att undersöka tidsmässig och rumslig variabilitet i datamaterialet har variationskoefficienten beräknats, på samma sätt som beskrivs i avsnitt 3.1.2.

I de ytliga lagren uppvisar datamaterialet en hög variationskoefficient, med ett toppvärde för lager 4 (cirka 1,2), vilket representerar cirka en meters djup. Därefter sjunker variationskoefficienten med djupet ned till sex meters djup där den stabiliseras lite över 0,2. Grundvattenytan antas ligga på cirka fem meters djup vilket kan bidra till en lägre variabilitet i mätningarna. Längst ned, på cirka 14 meters djup, sjunker variationskoefficienten till nästan noll.

I figur 3.26 har korrelationen mellan hög resistivitet och hög variabilitet plottats i horisontella plan (djupsnitt) som representerar sex lager på relativt ytliga nivåer. Den relativt stora variabilitet som visas i diagrammet i figur 3.25, och i figur 3.24, syns även i figur 3.26. Det framkommer dock inte någon tydlig korrelation mellan resistivitet och variationskoefficient.



Figur 3.26. Horisontella plan som visar resistivitetsvärden och variationskoefficienter för lager på sex olika djup, från mätningar på Hyllstoftadeponin under perioden 3 till 7 november, 2008.

3.3.3 Korrelation med mätningar av temperatur och metanläckage.

Hyllstofta

3.3.3.1 Systematiska temperaturmätningar i mark





Temperatur i markytan mättes vid fyra tillfällen mellan den 28 oktober och 7 november. En mätomgång omfattade mellan 31 och 60 punkter och tog cirka två timmar att genomföra vilket medför att mätningen inte ger en ögonblicksbild av marktemperaturen. I figur 3.27 visas mätpunkterna för de fyra mätningarna, och resultaten av mätningarna. I en zon som sträcker sig längs 20 meters markeringen i figur 3.27 uppmättes förhöjd temperatur vid samtliga mätningar. Läget för zonen stämmer bra överens med "luckan" i ytlagret som uppvisades i resistivitetsmätningarna (Figur 3.21 och 3.22). Det indikeras alltså ett samband mellan relativt låg resistivitet och hög temperatur.

3.3.3.2 Temperaturmätningar i luft och mark

Temperatur i mark och luft korrelerar som förväntat, med en relativt högre temperatur i marken (Figur 3.28). Marktemperaturen nådde inte under noll grader trots att lufttemperaturen var under noll vid vissa tillfällen. Den högre temperaturen i marken förmodas bero på ett värmetillskott från den biologiska aktiviteten i deponin.



Figur 3.28: Temperaturmätningar vid Hyllstoftadeponin under perioden 10 oktober till 7 november, 2008.

3.3.3.3 Korrelation med mätningar av metanläckage

Mätning av metan med laserinstrument, som utfördes vid två tillfällen på Hyllstoftadeponin visade i huvudsak på två områden med läckage av metan (Figur 3.29). Det område som visade högst läckage låg inom samma område där hög temperatur och låg resistivitet hade uppmätts. I detta område indikeras sålunda ett läckage av metan som kan ge upphov till förhöjd temperatur och relativt låg resistivitet. Den låga resistiviteten beror sannolikt delvis på att materialet på cirka en meters djup påverkar de ytnära mätningarna. Ytterligare ett område i ena hörnet uppvisade läckage av metan. I samma del av mätområdet visade resistivitetsmätningarna låg resistivitet i det ytliga lagret.



Figur 3.29: Resultat av mätningar av metanläckage med laserinstrument genom täckskiktet på mätområdet på Hyllstoftadeponin.

3.4 Flishultsdeponin



3.4.1 Resultat – Resistivitetsmätningar på Flishultsdeponin

Figur 3.30: Vertikala sektioner från 3D-modell från resistivitetsmätningarna på Flishultsdeponin den 11 november, 2008.

I figur 3.30 och 3.31 visas resultat från mätningarna som utfördes på Flishultsdeponin den 11 november mellan klockan 16.00 och 18.00. Figurerna visar utvalda tvärsnitt respektive en volymsbild av 3D-modellen från mätningarna. Försökuppställningen på Flishultsdeponin bestod av sex parallella linjer med fyra meters avstånd mellan linjerna. Linjernas längd var 62 meter och elektrodavståndet två meter.

I modellen (Figur 3.30 och 3.31) syns en tydlig gräns mellan ett område med hög resistivitet till höger i figuren och låg resistivitet till vänster. I området med hög resistivitet uppvisas nivåer på över 200 Ω m, medan resistiviteten i den södra delen ligger under 10 Ω m. I figurerna 3.30 och 3.31 syns det också att området med hög resistivitet sträcker sig in under området med låg resistivitet. På större djup har avfallet en relativt jämn resistivitet mellan cirka 5 och 15 Ω m.

Baserat på resultat av de grävda provgroparna kan det konstateras att materialet med hög resistivitet är relaterat till det material som härstammar från glasindustri, medan områden med låg resistivitet representerar område med blandat avfall (se även figur 2.11).



Figur 3.31: 3D-modell från resistivitetsmätningarna på Flishultsdeponin den 11 november, 2008.

Flishultsdeponin



Figur 3.32: Medelvärdet på resistivitetvärden för 17 horisontella lager i Flishultsdeponin.

I figur 3.32 visas medelvärde på resistivitet för 17 horisontella lager i Flishultsdeponin, från ytan till över 35 meters djup. Medelvärdet representerar samtliga mätningar i respektive lager under hela mätperioden (11 till 15 november).

Vid ytan uppvisas ett medelvärde för resistiviteten på knappt 30 Ω m, därefter stiger den till ett toppvärde på cirka 65 Ω m på knappt fem meters djup. Därefter sjunker medelvärdet på resistiviteten med djupet för att stabiliseras på cirka tio meters djup på knappt 10 Ω m.

3.4.2 Variabilitet i 3D-modeller från resistivitetsmätningarna

Mätningarna som utfördes på Flishultsdeponin pågick från den 11 till 15 november med tolv mätomgångar per dygn, vilket resulterade i mycket stora mängder mätdata. Genom att beräkna variationskoefficienten har variabiliteten i datamaterialet undersökts på samma sätt som beskrivs i avsnitt 3.1.2.



Figur 3.33: Variationskoefficienten för samtliga mätpunkter (celler) för resistivitetsmätningar på Flishultsdeponin under perioden 11 till 15 november, 2008.

Det finns relativt stora områden med mycket hög variationskoefficient (över 1) i de ytliga lagren, men det finns även områden med mycket låg variationskoefficient (under 0,03) i ytan (Figur 3.33). De områdena med hög variationskoefficient är relativt sammanhängande och finns i övre vänstra delen på bilden. Det största sammanhängande området med låg variationskoefficient finns i nedre högra kanten på bilden. Inga kända strukturer i deponin motsvara dessa områden.

Flishultsdeponin



Figur 3.34: Variationskoefficienternas förändring med djupet för resistivitetsdata från Flishultsdeponin under perioden 11 till 15 november, 2008.

För att undersöka tidsmässig och rumslig variabilitet i datamaterialet har variationskoefficienten beräknats, på samma sätt som beskrivs i avsnitt 3.1.2.

I de ytliga lagren uppvisar datamaterialet en hög variationskoefficient, med ett toppvärde för lager tre (cirka 2), vilket representerar cirka 1,5 meters djup (Figur 3.34). Därefter sjunker variations-koefficienten drastiskt med djupet ned till cirka fem meters djup där den stabiliseras kring 0,5. På djup över 15 meter sjunker variationskoefficienten och stabiliseras på cirka 0,25-0,30.

I figur 3.35 har korrelationen mellan hög resistivitet och hög variabilitet plottats i horisontella plan (djupsnitt) som representerar sex lager på relativt ytliga nivåer. Högst variationskoefficient finns i de lagren där avfall med låg resistivitet finns. Det betyder att avfall från glasindustrin uppvisar mindre variabilitet än organiskt avfall, vilket kan förväntas eftersom det är ett relativt inert material. På större djup, under tio meter, är variabiliteten låg. Detta beror sannolikt bland annat på en lägre upplösning i data, men det är också möjligt att grundvattenytan finns på större djup i deponin.



Figur 3.35. Horisontella plan som visar resistivitetsvärden och variationskoefficienter för lager på sex olika djup, från mätningar på Flishultsdeponin under perioden 11 till 15 november, 2008.

3.4.3 Korrelation med mätningar av metanläckage och temperatur.

3.4.3.1 Mätningar av metanläckage

Vid två tillfällen utfördes mätningar av metanläckage med laserinstrumentet, vid båda mättillfällen registrerades två utsläppspunkter. Ett utsläpp kommer från en gasbrunn cirka 30 meter från området och en annan är ett cirka 15 m² stort område i utkanten av området (Figur 3.36). Vid detta område fanns det avfall i markytan. Delar av mätområdet täcktes av vattenpölar där det på enstaka ställen bubblade upp gas. Skissen nedan visar området och utsläppspunkterna.



Figur 3.36: Resultat av mätningar av metanläckage med laserinstrument genom täckskiktet på mätområdet på Flishultsdeponin.

3.4.3.2 Temperaturmätningar

Temperatur i mark och luft korrelerar som förväntat, med en relativt högre temperatur i marken. Under mätperioden sjönk lufttemperaturen till under noll vilket innebar att vattensamlingarna på ytan av deponin frös till is, men marktemperaturen nådde inte under noll grader. Den högre temperaturen i marken förmodas bero på ett värmetillskott från den biologiska aktiviteten i deponin.



Figur 3.37: Temperaturmätningar vid Flishultsdeponin under perioden 10 till 20 november, 2008.

4 Diskussion

Resistivitetsmätningar utfördes på fyra olika deponier under vår, sommar och höst 2008, biocellreaktor (NSR – Helsingborg), Filbornadeponin (NSR – Helsingborg), Hyllstofta (Nårab – Klippan) och Flishult (Vetab – Vetlanda). Alla mätningar utfördes med 3D-uppställning och all data har tolkats med programvaror som är framtagna för att tolka i 3D. Flishultsdeponin skilde sig från de övriga i ett avseende, nämligen att elektrodavståndet var dubbelt så stort (2 meter) som vid övriga mätningar. Det innebär att nedträngningsdjupet blir dubbelt så stort, men också att upplösningen i mätdata blir lägre. Utöver resistivitetsmätningar, genomfördes mätningar av portryck i deponin, grundvattennivåer, samt temperatur och konduktivitet i grundvatten, mätning av metan på ytan av deponierna, samt temperaturmätning i mark och luft.

Resultaten av de resistivitetsmätningar som har utförts på samtliga 4 deponier stämmer väl överens med tidigare resultat från motsvarande mätningar på deponier som har visat att resistiviteten i blandat avfall oftast är lågt, typiskt i storleksordningen några enstaka Ω m till cirka 50 Ω m (Bernstone and Dahlin, 1997, Guérin et al., 2004, Rosqvist et al., 2005). I figur 4.1 visas medelvärde på resistivitet för 17 horisontella utvärderingslagerlager i samtliga deponier. Det bör påpekas att lagren representerar olika djup under markytan. Ytligt ser man en stor spridning mellan lagren, mellan cirka 90 Ω m i Hyllstoftadeponin och strax under 20 Ω m i biocellreaktorn. På större djup är spridningen mindre, men fortfarande relativt stor, mellan cirka 40 Ω m i Hyllstoftadeponin och under 5 Ω m i biocellreaktorn. Flishultsdeponin höga resistivitet i lager 4-7 representerar material med hög resistivitet (restprodukter från glasindustrin). Lager med mycket låg resistivitet i Hyllstoftadeponin, lager 4-9, representerar ett skikt i deponin som består av avfall med högt innehåll av aska.



Figur 4.1: Medelvärdet på resistivitetvärden för 17 horisontella utvärderingslager i samtliga deponier. Det bör påpekas att de olika lagren inte representerar samma djup i deponierna.

Samtliga mätningar visar att det finns en stor potential för tekniken med resistivitet för att undersöka fysiska strukturer i en deponi. När mätningarna utförs i 3D och resultaten också kan presenteras i 3D framkommer vissa strukturer i deponierna mycket tydligt. Exempel på detta är det flisfyllda diket i biocellreaktorn, kompostvallen i Filbornadeponin, en lucka i sluttäckningen på Hyllstoftadeponin, och utbredningen av ett relativt inert material i Flishultsdeponin (restprodukter från glasindustrin). Om mätningarna utförs och presenteras i form av ett fåtal mätlinjer med 2Dteknik kan det i vissa fall vara svårare att identifiera sådana strukturer. De strukturer som visades i 3D-mätningarna var till viss del kända, men det framkom även ny information tack vare resistivitetsmätningar och tolkningar.

Eftersom snabba förändringar i resistivitet är en av de faktorer som kan indikera gasrörelser i avfallet har vi, genom att använda variationskoefficienten, undersökt variabiliteten i datamaterialet från resistivitetsmätningarna. Figur 4.2 visar variationskoefficienten för olika utvärderingslager och hur de förändras med djupet, för samtliga deponier. Variationskoefficienten i de ytliga lagren uppvisar en stor variation, mellan cirka 2 för Flishultsdeponin och drygt 0,5 för Filbornadeponin. På större djup är variationskoefficienten i de olika deponierna betydligt mer samlad och varierar mellan cirka 0,2 och 0,5. Den relativt lilla spridningen i variationskoefficient på större djup beror sannolikt till viss del på att mättade grundvattenförhållanden medför mindre variabilitet i resistivitet. En ytterligare förklaring är att mätdata har lägre upplösning på större djup.

Samtliga deponier visar ett toppvärde för variationskoefficienten i lager 3 eller 4. Detta visar att temperaturvariationerna i markytan till följd av dygnvariationer i lufttemperatur inte utmärker sig som höga variationer i resistivitetsmätningarna. De höga variationskoefficienterna på ett djup av cirka 1 meter (lager 3-4) tolkas som indikationer på gasrörelser strax under markytan. Man kan tänka sig att gasen ansamlas under täckskiktet och att relativt höga tryck byggs upp på cirka en till två meters djup.



Figur 4.2: Variationskoefficienternas förändring med djupet för resistivitetsdata från samtliga deponier.

Ett av de viktigaste resultaten i detta projekt är att vi ser en hög variabilitet resistivitetsdata och att det i vissa fall korrelerar med andra mätningar. Till exempel ser man en korrelation mellan hög resistivitet och hög variabilitet i resistivitetsmätningarna i biocellreaktorn vid området där det flisfyllda diket finns. I detta område uppmättes även ett negativt portryck till följd av närheten till systemet för gasuttag. I Filbornadeponin visade sig området vid och ovanför kompostvallen vara mycket intressant. I området uppmättes höga portryck samt hög resistivitet och hög variabilitet i resistivitetsdata, och i samma område uppmättes höga metanläckage genom ytan. Följaktligen visade samtliga mätningar i detta område indikationer på gasrörelser. Vi har inte kunnat finna någon alternativ förklaringsmodell till de mönster i variation av resistivitets som vi har dokumenterat, som inte innefattar ansamling och rörelser av gas. Därför betraktas resultaten i mätningarna i detta område som de viktigaste resultaten som uppnåtts i projektet. I Filbornadeponin uppmättes även låga portryck (nästan noll) i en punkt som var placerad i ett område med låg resistivitet och låg variabilitet i mätdata.

Resistivitet påverkas av flera parametrar; fukthalt, joninnehåll i vatten, temperatur, och gasrörelser. Det medför att systemet inuti en deponi är mycket komplext. Vissa parametrar samvarierar sannolikt, till exempel ändras temperaturen till följd av gasrörelser. Grundvattenobservationer i biocellreaktorn uppvisade stora lokala skillnader i nivåer, temperatur och konduktivitet. Eftersom såväl temperatur och konduktivitet som fukthalt påverkar resistiviteten bör dessa parametrars inverkan på resistiviteten undersökas. Mätningarna i detta projekt har visat på en mängd variationer som kan relateras till gasrörelser i avfallet. I Flishultsdeponin fanns en hög variabilitet i resistivitetsdata i samma område som metanläckage uppmättes och i Hyllstoftadeponin indikerades ett samband mellan relativt låg resistivitet och hög temperatur.

Vid arbete i fält har det konstaterats att miljön på en deponi kan vara mycket aggressiv mot mätutrustning som lämnas periodvis i fält.

5 Slutsatser och förslag på framtida forskning och utveckling

De viktigaste resultaten från projektet sammanfattas i Tabell 5.1.

Tabell 5.1. De viktigaste resultaten från projektet.

De viktigaste resultaten

1. Resultaten från detta projekt stämmer väl överens med resultat som presenterats från tidigare studier.

2. Mätningarna visar på stora rumsliga och tidsmässiga variationer. Variationerna avtar med djupet.

3. Variabiliteten i resistivitetsdata har kunnat kopplas till uppmätta gasflöden

4. Resistivitet kan vara en mycket kraftfull metod för att undersöka fysiska strukturer i det inre av deponier.

5. Resultaten från resistivitetsmätningarna korrelerar med andra mätningar, till exempel grundvattennivå, portryck, metanläckage vid ytan och temperatur.

6. Det finns ett behov att undersöka påverkan på resistivitetsvärden från andra processer, framför allt portryck och temperatur, men även joninnehållet i vatten är vikigt.

Tabell 5.2 sammanfattar hur projektet har bidragit till utveckling.

Tabell 5.2. Projektets bidrag till utveckling

Projektet har bidragit till utveckling

Teknik och en metodik som baseras på resistivitetsmätningar för att bättre förstå förekomst och rörelser av gas och vatten i deponier har utvecklats.

En bättre förståelse för att kunna utnyttja energipotentialen i gasen och att minska föroreningsbelastningen till atmosfären och till vattenresurser.

Kunskap inom tillämpning av geofysiska mätningar på deponier för karakterisering av deponiers ingående material har byggts upp

Bättre verktyg och förståelse för kartläggning av interna strukturer, som kan agera som barriärer för vatten och gas, har utvecklats.

Förståelsen för att kartlägga samband mellan gasrörelser inne i en avfallsdeponi och gasläckage genom deponins täckskikt har utvecklats.

Projektets målsättningar

Målsättningen med projektet har varit att ge svar på, eller bidra till bättre förståelse av, ett antal frågeställningar. I Tabell 5.3 sammanfattas frågeställningarna och de svar som arbetet inom projektet har tagit fram.

Tabell 5.3: Sammanfattning av hur projektets målsättningar har uppfyllts

Frågeställning	Resultat från projektet
Går det att detektera deponigas med resistivitetsmätningar?	Resultaten inom projektet visar att det är möjligt att detektera gas i deponier
Går det att kvantifiera förekomst av gas i deponier?	Befintlig teknik och kunskap medför inte att det går att kvantifiera gasförekomst.
Går det att se interna strukturer, och i så fall med vilken upplösning?	Mätningarna visar att det går mycket bra att detektera interna strukturer. Utvecklingen av 3D-teknik gör att interna strukturer blir tydligare.
Går det att detektera vattenförekomst i deponier?	Mätningar i detta projekt har inte haft vattenrörelser som huvudsyfte, men mätningarna konfirmerar tidigare presenterade resultat som säger att det är möjligt att detektera vattenförekomst i deponier.
Kan metoden användas för att karakterisera avfallet?	Med befintlig teknik och kunskap kan viss karakterisering av avfall utföras. Till exempel kan områden med inert material skiljas från avfall med högre organiskt innehåll.
Hur mycket referensdata i form av konstruktionsritningar, geoteknisk sondering/borrning är nödvändig som komplement till geofysisk data?	Mätningarna visar att behovet av referensdata för att verifiera resultat från resistivitetsmätningar är stort. Framförallt om man eftersträvar stor säkerhet i resultaten.
Hur långa mätserier behöver vi, och vilken upplösning i tid är relevant?	Resultaten visar att gasrörelser är mycket snabba processer vilket medför att upplösning i tid måste vara hög. I projektet mättes kraftiga förändringar på timbasis.
Räcker 2D mätningar eller behöver vi 3D för att kunna upplösa de heterogena strukturerna i deponin?	Mätningarna har visat att 3D-anlyser är mycket kraftfulla för att förbättra förståelsen för inre strukturer i deponier.
Finns det andra metoder (t.ex. andra geofysiska mätningar eller mätningar på deponins yta av olika slag) som kan komplettera resistivitet?	Inducerad polarisation är en metod som är mycket intressant och som kan komplettera resistivitetsmätningar i vissa sammanhang. Denna metod har inte analyserats inom ramen för projektet.
Hur presenteras data på ett effektivt sätt?	Resultaten från resistivitetsmätningar presenteras effektivast i grafisk form, i 2D eller 3D. Eftersom mätningar utförs i tidsserier kan animationer vara ett starkt verktyg för att öka förståelsen för processer i deponier.

Förslag på framtida forskning och utveckling

Det finns ett behov att ytterligare undersöka påverkan på resistivitetsvärden från andra processer i avfall. Viktiga parametrar är till exempel, fukthalt, joninnehåll, portryck och temperatur. Fortsatt forskning och utveckling inom området bör därför utreda dessa parametrars inverkan på avfallets resistivitet, innan färdiga system för kommersiell tillämpning kan göras tillgängliga. Potentialen för resistivitetsmetoden för att detektera inre strukturer är stor, speciellt när 3D-teknik tillämpas. Framtida forskning bör därför undersöka ytterligare möjligheter inom detta område.

6 Referenser

Bernstone, C., and Dahlin, T. 1997. DC resistivity mapping of old landfills: two case studies. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics 2, 121-136.

Bouye, J-M., Budka, A., Courant P., Ripaud, F., and Moreau S. 2007. Towards the determination of volumetric water content in waste body from electrical resistivity: Laboratory tests. Proceedings Sardinia-07, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.

Dahlin, T. (1996) 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications, *First Break*, 14(7), 275-283.

Geotomo Software (2008) RES3DINV ver. 2.16 etc - Rapid 3D Resistivity & IP inversion using the least-squares method, http://www.geoelectrical.com/, 80p.

Guérin, R., Munoz, M.L., Aran, C., Laperrelle, C., Hidra, M., Drouart, E., and Grellier, S. 2004. Leachate recirculation: moisture content assessment by means of a geophysical technique. Waste Man, 24, 785 – 794.

Grellier, S., Bouye, J.M., Guerin, R., Moreau, S., Robain, H., and Skhiri, N. 2005. Influence of temperature and moisture on electrical resistivity of leachate and waste samples.; Proceedings Sardinia-05, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, October 2005.

Ljungberg, S-Å., Meijer, J-E., Rosqvist, H., och Mårtensson, S-G. 2009. Detektering och kvantifiering av metangasläckage från deponier. SGC Rapport 203.

Robinson, E.S., and Coruh, C. 1988. Basic exploration Geophysics, Wiley, New York, 562p.

Rosqvist, H., Dahlin, T., and Lindhé, C. 2005: Investigation of water flow in a bioreactor landfill using geoelectrical imagining techniques. Proceedings Sardinia-05, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.

Rosqvist, H., Dahlin, T., Linders F., and 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.

VOGUE-project (Visualiasation of Gas for the Utilities and the Environment, EU-report NNE5-1999-20031, August 2004.



Scheelegatan 3, 212 28 Malmö • Tel 040-680 07 60 • Fax 040-680 07 69 www.sgc.se • info@sgc.se