

Detektering och kvantifiering av metangasläckage från deponier

©Svenskt Gastekniskt Center – Mars 2009



Sven-Åke Ljungberg, Höskolan i Gävle
Jan-Erik Meijer, NSR AB
Håkan Rosqvist, NSR AB
Stig-Göran Mårtensson, Höskolan i Gävle

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, Lunds Energikoncernen AB (publ), Göteborg Energi AB, och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Avfall Sverige
Nordvästra Skånes Renhållnings AB
SÖRAB
SYSAV Utveckling AB
SITA, Sverige
SITA Environnement, Frankrike
Energimyndigheten

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Held

Författarnas förord

I projektbeskrivningen som legat till grund för ansökan om medel till det aktuella projektet görs en kortfattad redovisning av problematiken kring mätning och kartläggning av metanemissioner från avfallsupplag utifrån aktuell forskningslitteratur och utifrån erfarenheter från ett EU-projekt, VOUGE-projektet, Visualisation of Gas for Utilities and the Environment, NNE5-1999-20031, 2004. I projektansökan till RVF (numer Avfall Sverige) och SGC redovisas resultat och slutsatser från en förstudie för detektering och kartläggning av metanemissioner med fjärranalys vid Filborna avfallsupplag.

Detta projekt har tillkommit genom ett samarbete mellan avfallsbolag i Sverige och Frankrike och med bidragsmedel från Avfall Sverige, Svenskt Gastekniskt Center och SITA Environnement, Frankrike.

Projektet omfattar utveckling och forskning rörande hur laser och IR-teknik kan användas för att detektera och kvantifiera metanemissioner från avfallsdeponier. Det laserinstrument som använts vid alla fältstudier har varit VOGUE Siemens AG, CT PS 8 Remote Natural Gas Leak Detector Field Unit. Två prototypinstrument från Siemens har använts under hela projektiden. FLIR SYSTEMS AB, Danderyd Sweden har medverkat i projektet med en nyligen introducerad IR-kamera för gasdetektering; FLIR ThermoCAM™ GasFindIR LW.

SIEMENS AG, München, genom dr Rainer Strzoda har välvilligt ställt upp med kompetens inom gaslaser-teknologi. Inom FLIR Systems AB i Danderyd har Anders Andreasson välvilligt bistått med kompetens inom IR-teknik och som diskussionspartner kring fältmätning av metanemissioner.

En referensgrupp med medlemmar från bidragsorgan och medverkande avfallsbolag har träffats fem gånger under projektiden för att diskutera och ge synpunkter på projektets olika delar.

Referensgruppen har bestått av följande medlemmar:

Utvecklingschef	Stig Edner	SYSAB Utveckling AB
Utvecklingsingenjör, Dr	Staffan Salö	SYSAB Utveckling AB
Miljöledare	Herman Brundin	SÖRAB
Driftchef	Tor Sivesind	SÖRAB
Produktchef	Per Olsson	Gästriklands Avfallshantering AB
Utvecklingschef	Staffan Karlsson	Svenskt Gastekniskt Center
Utvecklingsingenjör	Anna Åkerman	Cirade SITA Environnement, Frankrike
Projektchef	Marion Crest	Cirade SITA Environnement, Frankrike
Miljöchef	Olle Alfredsson	SITA, Sverige
Enhetschef	Mikael Jonsson	Avfall Sverige
Forskningschef, Dr.	Håkan Rosqvist	NSR AB

Därtill har många av medarbetarna vid de undersökta anläggningarna medverkat vid fältmätningar, försett oss med information av olika slag och kommit med goda synpunkter.

Professor Anders Lagerkvist, Luleå Tekniska Universitet (LTU), har medverkat vid planering och analys av kammarmetodmätningarna och givit värdefulla uppslag och synpunkter på olika vegetationstypers betydelse som indikator på förekomst av metanemissioner från avfallsdeponier. Roger Lindfors (LTU) har på ett förtjänstfullt sätt medverkat som ansvarig operatör av kammarmetodmätningarna vid de olika deponierna i Sverige och i Frankrike. Magnus Lindsjö, NSR AB har deltagit vid olika fältstudier med laser och IR-kamera samt vid kammarmätningar vid svenska och franska deponier. Professor Mats Sandberg, Högskolan i Gävle (HIG) har bidragit med sitt kunnande inom strömningsteknik applicerat på avfallsdeponier. Docent Gunnar Börjesson, Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) har medverkat med bearbetning och analys av mätdata från kammarmetodmätningarna med gaskromatografi.

Vi vill tacka alla som medverkat i projektet, och särskilt de som ovan nämnts som bidragit med värdefull sakkunskap och goda synpunkter.

Författarna

NOMENKLATUR

Teknik och metodbegepp:

Fjärranalys (Remote Sensing) – Samlingsnamn för teknologi med vars hjälp man registrera och mäter egenskaper hos ett objekt utan att vidröra och påverka objektet

Remote gas detection – Detektering och kartläggning av gasemissioner med passiv (IR) eller aktiv (laser) teknik med direkt mätning i realtid utan att vidröra eller påverka gasen

Operativt våglängdsområde – Avser det spektralområde där lasern eller IR-systemet registrerar och detekterar metangas

Active remote laser gas detection – Mätteknik där en laserstråle sänds ut och registrerar metankoncentrationen utmed en strålgång där laserstrålen återreflekterats från en bakgrundsytta (backscatterytta)

ppm parts per million, mått på gaskoncentration

ppb parts per billion, mått på gaskoncentration

ppm x m, mått på gaskoncentrationen utmed en mätsträcka

IR-absorption – En gas absorberar infraröd strålning vid definierade våglängder

Strålgång – Sträcka där laserstrålen sänds ut och returneras från en bakgrundsytta

Laserteknik – Här avses VOGUE Siemens AG, CT PS 8 Remote Natural Gas Leak Detector Field Unit, som arbetar med en infraröd laser, 1651 nm

Tekniska begrepp för Siemens lasersystem:

Tid respons	100 ms
Detektionsområde för lasern- gaskoncentration	$0 \geq 1000 \text{ ppm} \times \text{m}$
Operativt avstånd/räckvidd (range)	$\geq 10 \leq 30 \text{ m}$, beroende på egenskaper hos reflekterad backscatterytta

Outlier – En observation som numeriskt väsentligt avviker från resten av observationerna.

Passive remote gas detection – Definieras som teknik som detekterar och registrerar metanemissioner med en passiv detektor, här specifikt känslig inom metangasens infraröda spektralområden

Infraröd teknik – Här avses FLIRs ThermaCAM™ GasFindIR LW

Realtid – Registrering, presentation och lagring av mätdata direkt vid mättidpunkten, avseende laser, IR- och fältreferensdata

Skanning – Översiktlig detektering och kartläggning av metanemissioner

Pinpointing – Lägesrelaterad detektering av gasläckage vid läckagekällan

GPS – Globalt Positionerings System, här avses lägesbestämning av metanemissioner från avfallsdeponier med högupplösande GPS

Indikatormetod – Metod som direkt eller indirekt indikera/påvisar förekomst av metanemission som en sekundär effekt av förhöjd strålningstemperatur eller avvikande strålningstemperaturmönster förorsakad av ett metanläckage

Visualiseringsmetoden – Metod med teknik med en detektor känslig inom gasens specifika våglängdsområde som synliggör metangas och metangasens spridningsbild

Koncentrationsdata – Metanemission uttryckt i måttsenheten ppm

Flödesdata – Gasemission uttryckt i flödesenheten l/min eller annan enhet, i litteratur förekommer en mängd andra måttenheter såsom l/m², år, g/m², etc.

Backskatteryta – Yta mot vilken lasern sänder ut och returnerar laserstrålen

Reflektoryta – Yta med reflekterande material som används för att förstärka den bakåtskråande signalen till lasern i avsikt att öka räckvidden vid mätning med gaslaser system

Statisk kammare (kammarmetoden) – Mätning av deponigasemissionen på ytan av en deponi med en sluten huv. Från mätning av koncentrationsökningen av metan under huven beräknas flödet ut från deponiytan

Dynamisk kammare (kammarmetoden) – Mätning av deponigasemissionen på ytan av en deponi med en öppen huv. Beräkning av flödet sker med samtidig mätning av flöde genom huven och koncentrationen av metan

Gaskromatografi-fördelningskromatografi – Kemisk analysmetod för att särskilja kemikalier, gaser i ett prov, här använt i samband med utvärdering av kammarmetodmätningar

Fältlaborativa mätningar Mätningar i fält med anläggning som medger simulering och mätning under kontrollerbara förhållanden

Geoelektricitetsmätningar (Resistivitetsmätningar) Mätning av jordars eller avfalls elektriska konduktivitet. Sker genom utsättning av elektroder på ytan, och mätning av det elektriska motståndet mellan elektroderna

Logger – Lagringsmedia för realtidslagring av mätdata i fält

Temperaturreferenssystem – Temperaturpanel med radiatorer som medger reglering och bestämning av referenstemperatur med datorstyrd reglerutrustning

Massflödesregulator – System för reglering av gasflöden

Kostnadseffektiv teknik och metoder – Mätteknik och metoder som är billigare och lättare att använda jämfört med mer arbetsintensiva och kostnadskrävande teknik och fältmetoder

Deponibegrepp:

Anaerob nedbrytning av organiskt material – Nedbrytning av organiskt material utan tillgång till syre

Hydrolyssteg – Första steget i den anaeroba nedbrytningsprocessen

Naturgas – Gas från fossilt material

Biogas eller Deponigas – Gas från avfallsdeponier, eller rötanläggningar

Metangas (CH₄) – Kemisk benämning på gas från fossila källor, naturgas, samt från deponier och rötanläggningar

Emission – Gas som avgår/emitterar från en deponiyta, gasdistributionssystem, eller naturskapade källor (torvmossar, sjösystem med organiskt sediment, etc)

Diffusion – En gas naturliga tendens att vilja uppnå en likformig koncentration i rummet

Jetstråle – Kraftigt flöde genom en trång passage med en uppåtriktad kraftfull gasstråle

Antropogena CH₄-emissioner – Av människan skapad emission av metan

CO₂-ekvivalenter i ett 100-års perspektiv – Översättning av en emissions växthuseffekt till utsläpp av koldioxid i ett hundraårsperspektiv

Organiskt kol – Det kol som ingår i växter eller djur

Hydralisk konduktivitet – Ett materials vattengenomsläpplighet

Tryckgradient – Tryckskillnad

Energiaspekten – Ta fram underlag för förebyggande kontroll och underhåll av energirelaterade åtgärder för att ta till vara på metan som en energikälla

Miljöaspekten – Utarbeta åtgärder för att minska metanemissioner till atmosfären

Säkerhetsaspekten – Relaterat till beslutsunderlag för olika säkerhetsåtgärder

Typytor – Ytor som till sin form och förekomst skiljer sig från varandra och är representativa för merparten förekommande deponier i Sverige, här definierade som överyta, slänt, släntrön och slänthot

Vindinducering – Inverkan av turbulenta vindrörelser på transport och emission av metangas vid markytan på en deponi

Tätskikt – Översta täcklagret på en deponiyta

Gasuttagssystem – Anläggning för uttag och transport av metangas från en avfallsdeponi

Lakvattensystem – Anläggning för uppsamling och transport av lakvatten från en avfallsdeponi

Barriärssystem – I deponisammanhang ett system för begränsning av utsläpp till luft eller vatten, vanligtvis bestående av tätlager som hindrar t ex strömning av vatten. Måste oftast kombineras med en dränfunktion som bortleder på ett kontrollerat sätt.

Deponicell – En avgränsad volym för avfall som fylls på ett kontrollerat sätt och inom fysiska avgränsningar med botentätning, uppbyggda sidor och som efter fyllning förses med tätning ovan avfallet.

Pallar – Den avgränsade volym i en avfallscell som fylls från en nivå till en annan. Höjden är vanligtvis 3-5 m.

Pallskarvar – Övergången från en pall till ovanför liggande pall.

Permeabilitet – Mått på genomsläpplighet för gas och vatten i t.ex. jord.

Biocellreaktor – Avgränsad enhet för kontrollerad biologisk nedbrytning av organiskt avfall.

Övriga begrepp

LANDGEM – Beräkningsmetod för framtagande av gasbildningen för en deponi.

EUs E-PRTR regler, 2007 – EUs regler för handhavande av avfallsdeponier.

VOGUE – Visualisation of Gas for Utilities and the Environment, ett EU-projekt.

SAMMANFATTNING

Avfallsdeponier bidrar i väsentlig grad till antropogena utsläpp av växthusgaser i form av deponigasemissioner som innehåller metan. Det finns behov av att få bättre kännedom om hur läckage av metan sker och av att beräkna dess storlek.

Syftet med detta projekt har varit att detektera gasläckage och att mäta och kvantifiera metangasemissionen från avfallsdeponier med hjälp av modern fjärranalys. I projektet har ett handburet laserinstrument och en IR-kamera använts. Det övergripande målet har varit att utveckla kostnadseffektiva metoder för detektering och värdering av metanutsläpp från deponier. Det existerar en mångfald metoder för att mäta metankoncentrationen i luft, både på nära håll och över långa avstånd. I kombination med användning av en spårgas kan metanavgången från hela deponier mätas med relativt god noggrannhet. Det används ett antal metoder för att upptäcka läckage från delar av deponiytor. Metoder för kvantifiering av läckage från delytor är däremot fåtaliga.

Det laserinstrument (Siemens AG, CT PS 8 lasersystem) som använts i projektet kan detektera metankoncentration på 10-20 ppm och har en räckvidd på max 30 m vilken kan utökas till 150-200 m med hjälp av reflektormaterial som backskatteryta. Koncentrationen av metangas mäts i ppm x m och kan lagras i logger tillsammans med kompletterande fältdata, såsom deponi- och atmosfärstryck och data om väder- och utstrålningsförhållanden, för analys efter avslutad fältmätning. IR-kameran, (FLIR ThermoCAM™ GasFindIR LW) har nyligen introducerats på marknaden och har använts inom projektet för att detektera och visualisera gasemissioner från avfallsdeponier. I kameran görs gasemissionen synlig i en värmebild. Värmebildsdata lagras digitalt på en DVD-enhet kopplad till kameran.

Fältmätningar med laserinstrumentet och IR-kameran har utförts vid sju svenska deponier och två deponier i Frankrike. Undersökningsytorna på de svenska deponierna har delats in i olika typytor, såsom överyta, slänt, släntkrön och släntfot samt sluttäckta respektive icke sluttäckta ytor. Fältmätningarna i Frankrike har gjorts över hela deponier. Metanutsläppen varierar mellan de olika deponierna inom projektet samt mellan de olika typytorna. Resultat från upprepade fältmätningar indikerar att en sluttäckt deponi med ett väl fungerande gasuttagssystem ger knappt mätbara emissioner. De svaga punkterna på en avfallsdeponi är generellt slänter inklusive släntkrön och släntfot. Där täckningen av avfallet är bristfällig förekommer ofta läckage i pallskarvar och i områden där avfall sticker upp genom täckningen. Andra svaga punkter är brister i gasuttagssystem. Lakvattensystem kan leda deponigas och därigenom orsaka läckage av metan.

Laserinstrument detekterar punktutsläpp av metan genom mätning av metankoncentrationerna ovan utsläppspunkterna. IR-kameran detekterar och visualiserar förekomst av metanemissioner och kan användas för att spåra utsläppspunkter och för att visa spridningsbilden av metangas. Både laser- och IR-instrumentet kan användas för att lägesbestämma läckagekällan. Diffus emission kan bara detekteras om emissionen är stor, t.ex. i tipsår. Både laserinstrument och IR-kamera är lätta att arbeta med. Täckande skanning med laserinstrumentet kan göras över en yta av ca 1 ha per timme. Det minsta mätbara punktutsläppet ger en koncentrationsnivå av ca 60 ppm, vilket motsvarar en punktvis metanemission av storleksordningen 35-290 m³ CH₄/år.

Vid skanning över deponiytor konstaterades att läckage kan upphöra, bli större eller avta. Orsakerna till denna dynamik är många. Vindförhållanden, lufttrycksförändringar och förändringar i täcklagers fukthalt befanns vara de mest påverkande.

Vid sidan av vindhastighet och atmosfärens tryckvariationer är markfuktighet en viktig faktor som påverkar metanemissioner från deponiytor. Resultat från fältmätningar gällande samma objekt/ytor vid olika tidpunkter och med olika markfuktighet visade att porer stängs i ytskiktet vid vattentillförsel varvid deponigasläckaget minskar. De stora och ibland snabba förändringarna medför att det föreligger betydande svårigheter att ge en bild av hur metanläckaget fördelas över deponiytor.

Fältmätning av metanemissioner utfördes under olika årstider, också då deponiytor var snötäckta. Resultaten visar att metanemissioner sker lätt genom porös snö. Samma metankoncentration uppmäts under vintertid med snö för samma lägesbestämda läckageobjekt som under barmarksförhållanden.

I projektet har kammarmetoden använts för att försöka kvantifiera metanläckage som detekterats med laserinstrumentet. När alla mätvärden med kammarmetoden ställs mot motsvarande mätvärden med laserinstrumentet erhålls ett samband. På detta sätt erhålls kvantitativa mått på emissionen. Sambandet mellan mätvärdena från laser- respektive kammarmetodmätningar användes för att kvantifiera de detekterade punktutsläppen vid de två franska deponierna. De sammanlagda emissionerna från de två deponierna som detekterats med laserinstrumentet beräknades till 41 respektive 30 ton metan per år. Dessa kvantifierade metanutsläpp från detekterade punkter är små i förhållande till de totala emissionerna så som de redovisats av deponiägaren. Förhållandet indikerar att det är den diffusa avgången av metan som är dominerande, och inte de punktvisa utsläpp som sker genom hål, sprickor etc.

Om målet är att finna ett säkert mått på gasutläckage från en deponi är det högst troligt att kombinationen av lasermätning tillsammans med kammarmetoden inte har tillräcklig noggrannhet för kvantitativ säker bestämning av metanemissioner. Om målet t.ex. istället är att bestämma och prioritera var åtgärder bör sättas in för olika deponiytor för att minska utläckagen är kombinationen av laser och kammarmetoden användbar. Den mätmetodik som utprovats är tillämpningsinriktad med målet att mätningarna skall ge underlag för planering och genomförande av kort- och långsiktiga åtgärder. Manualer har utarbetats för laserinstrumentet och IR-kameran. De anvisar hur de bägge instrumenten skall användas vid detektering av metanemissioner från deponier, se bilaga 1.

I projektet har demonstrerats hur laserinstrumentet kan användas genom mätning mot en reflektor av enkelt slag. Mätning med en strålgångslängd upp till 200 m är möjlig. Exempel på tillämpning är mätning över lakvattendammar, vid sidan av en deponi samt på delar av en deponi. Sådana mätningar kan ge viktig information om emissionsförhållanden som är svåra att erhålla på annat sätt.

Geoelektriska mätningar har flera tillämpningsområden vad gäller avfallsanläggningar, framför allt vid studier av grundvattenföroreningar. Under senare år har även intresset för att undersöka processer inuti avfallsdeponier ökat. Baserat på kunskap från tidigare studier var ett av syftena i detta projekt att undersöka möjligheten att utnyttja tredimensionell utvärdering av resistivitetsmätningar för att bättre kunna mäta och förstå processerna under markytan. Enligt tidigare utförda undersökningar kan deponigasrörelser visualiseras genom utvärdering av georesistivitetsmätningar. Under experimentet utfördes resistivitetsmätningarna i elva linjer i ett område på tio gånger tio meter i en slänt intill en biocellreaktor.

Resistivitetsmätningarna visade värden i samma nivå eller något lägre än resultat redovisade i tidigare undersökningar. Hög vattenhalt, joninnehåll och högt organiskt innehåll kan förklara uppmätt låg resistivitet, medan ett högt gastryck i marken delvis förklarar hög resistivitet. Det bör även påpekas att temperaturvariationer påverkar resistiviteten. När resultaten från resistivitetsmätningarna jämfördes med resultat från mätningar med statisk kammare och laser mätningar, kunde inga uppenbara korrelationer konstateras. De gasrörelser som indikerades under markytan med resistivitetsmätningarna vid släntfot kunde delvis konfirmeras med mätningarna ovan markytan med laser eller statisk kammare.

Resultaten från projektet visar att kombinationer av laser, IR, kammarmetod och geo-resistivitetsmätningar är en framkomlig väg att beskriva och kartlägga metanemissioner från avfallsdeponier. Kartläggningen av emissionerna bildar ett konkret underlag för planering vid underhåll eller förbättrande åtgärder på deponiytor, och av gasuttags- och lakvattensystem.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	BAKGRUND	2
1.1	ALLMÄNT	2
1.2	PROBLEMBESKRIVNING	2
1.3	BEHOV AV ENKLA KOSTNADSEFFEKTIVA MÄTMETODER	4
2	SYFTE	4
3	MÅL OCH FORSKNINGSFRÅGOR	5
4	HYPOTESER	5
5	ORGANISATION	6
6	KUNSKAPSLÄGET	7
6.1	DEPONERINGSSTRATEGIER	7
6.2	DEPONINS KONSTRUKTION	7
6.3	NEDBRYTNINGSPROCESSEN	8
6.4	EMISSIONER	11
6.4.1	Allmänt	11
6.4.2	Lakvatten	11
6.4.3	Deponigas	12
6.5	SÄTTNINGAR	13
6.6	UTTAGSSYSTEM FÖR DEPONIGAS	17
6.7	DEPONIGASENS RÖRELSER	19
7	ÖVERSIKT ÖVER ETABLERADE MÄTMETODER	20
7.1	ALLMÄNT	20
8	BEHOVET AV NY KOSTNADSEFFEKTIV TEKNIK OCH METODER	24
9	FJÄRRANALYSMETODER FÖR STATUSBESTÄMNING AV GASEMISSIONER FRÅN AVFALLSDEPONIER	26
9.1	FJÄRRANALYS-TEKNIK OCH METODER	26
9.2	STATE-OF-THE-ART – PRODUKT OCH METODUTVECKLING	26
9.3	FÖRSTUDIE FÖR TEST AV LASER- OCH IR-SYSTEM FÖR DETEKTERING AV METANEMISSIONER FRÅN AVFALLSUPPLAG	27
9.4	LASERSYSTEM FÖR DETEKTERING OCH KARTLÄGGNING AV METANGASEMISSIONER FRÅN AVFALLSUPPLAG	31
9.5	HÖGUPPLÖSANDE INFRARÖD TEKNIK FÖR DETEKTERING OCH VISUALISERING AV METANEMISSIONER FRÅN AVFALLSUPPLAG	33
9.6	KRAVSPECIFIKATION PÅ FJÄRRANALYS FÖR DETEKTERING AV BIOGAS	34
10	METODVAL	37
10.1	ALLMÄNT	37
10.2	MÄTMETODER	40
10.3	ANVÄNDNING AV FÄLTMÄTNINGSUTRUSTNING	42
11	VAL AV UNDERSÖKNINGSOBJEKT OCH DEPONIYTOR	44
11.1	ALLMÄNT	44
11.2	SAMMANSTÄLLNING AV DATA FRÅN ANLÄGGNINGARNA	46

12	UTFÖRDA FÄLTMÄTNINGAR MED LASER OCH IR-INSTRUMENT	48
12.1	RESULTAT FRÅN FÄLTFLABORATIVA MÄTNINGAR VID MALMÖ BRANDKÅRS GASÖVNINGSPLATS	48
12.2	SLUTSATS FRÅN FÄLTFLABORATIVA TEST VID MALMÖ BRANDKÅRS GASÖVNINGSPLATS	52
12.3	RESULTAT FRÅN FÄLTMÄTNING AV METANEMISSIONER FRÅN AVFALLSDEPONIER I SVERIGE OCH I FRANKRIKE	53
12.4	METANEMISSIONER FRÅN TYPYTOR	53
12.4.1	<i>Metanemissioner från överyta – mätning med laser och IR-teknik.....</i>	53
12.4.2	<i>Metanemissioner från slänt – mätning med laser och IR-teknik.....</i>	58
12.4.3	<i>Metanemissioner från släntröner – mätning med laser och IR-teknik.....</i>	66
12.4.4	<i>Metanemissioner från släntfot – mätning med laser och IR-teknik.....</i>	69
12.5	METANEMISSIONER FÖR HÖGDALADEPONIN–SLUTTÄCKNING ENLIGT NYA EU- NORMER	70
12.6	METANEMISSIONER VID VINTERFÖRHÅLLANDEN MED SNÖTÄCKE	74
12.7	METANEMISSIONER FRÅN LAKVATTENSYSTEM OCH GASUTTAGSSYSTEM	78
12.7.1	<i>Metanemissioner från lakvattensystem.....</i>	78
12.7.2	<i>Gasemission från gasuttagssystem</i>	81
12.8	DETEKTERING AV METANEMISSIONER FRÅN DEPONI UTAN DEPONIGASUTTAG.....	84
13	MÄTNINGAR MED LASERINSTRUMENT OCH KAMMARMETOD	86
13.1	KAMMARMETOD OCH KONCENTRATIONS MÄTNING MED LASERINSTRUMENT, KONTROLLERAT FLÖDE	86
13.2	FÄLTMÄTNINGAR MED KAMMARMETOD OCH LASERINSTRUMENT	89
13.3	ÖVERYTOR	93
13.4	SLÄNTER OCH SLÄNTRÖNER	94
13.5	PROVYTA I SLÄNT, UPPREPADE MÄTNINGAR	96
13.6	RESULTATÖVERFÖRING AV KOMBINERADE MÄTNINGAR MED LASER OCH KAMMARMETODSMÄTNINGAR TILL EMISSIONSBERÄKNINGAR	98
14	RESISTIVITETSMÄTNINGAR	100
14.1	BAKGRUND OCH SYFTE	100
14.2	MATERIAL OCH METOD	100
14.2.1	<i>Området för fältexperiment</i>	100
14.2.2	<i>Utrustning.....</i>	103
14.2.3	<i>Mätningar</i>	103
14.2.4	<i>3D Invers modellering</i>	105
14.3	RESULTAT AV RESISTIVITETSMÄTNINGAR.....	105
14.3.1	<i>Resistivitet – absoluta värden.....</i>	106
14.3.2	<i>Resistivitet – relativa skillnader (time lapse inversion)</i>	108
14.3.3	<i>Jämförelse mellan mätningar med laser, statisk kammare och resistivitet....</i>	110
15	RESULTAT AV MÄTNINGAR I FRANKRIKE	114
15.1	BESKRIVNING AV MÄTNINGAR I FRANKRIKE.....	114
15.1.1	<i>Upplag F1.....</i>	114
15.1.2	<i>Upplag F2.....</i>	117
16	TESTCELLER VID SPILLEPENG.....	121
16.1	ALLMÄNT	121
16.2	MÄTNINGAR MED LASERINSTRUMENTET 2006.....	121
16.3	RESULTAT AV TÄCKNINGSINSATSER	122

16.4	KONTROLL MED LASERMÄTNING VID AVSTÄNGT GASUTTAG	122
16.5	MÄTNING MED KAMMARMETOD VID TESTCELLERNA	123
16.6	GASBILDNING OCH GASUTTAG I CELLERNA IDAG	123
17	ANDRA APPLIKATIONER.....	124
17.1	ALLMÄNT	124
17.2	MÄTNING MED LASERINSTRUMENT ÖVER LAKVATTENDAMMAR.....	124
17.3	MÄTNING LÄNGS VÄLA BÄCK, FILBORNA	127
17.4	MÄTNINGAR FRÅN UTGRÄVNING AV GAMMALT AVFALL	128
18	ANALYS OCH UTVÄRDERING	130
18.1	INSTRUMENTENS MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR.....	130
18.2	FAKTORER SOM PÅVERKAR LASER- OCH IR-MÄTNING AV METANEMISSIONER.....	134
18.3	GEORESISTIVITETSMÄTNINGAR, DISKUSSIONER OCH SLUTSATSER.....	140
18.4	MANUALER FÖR ANVÄNDNING AV LASERINSTRUMENTET OCH IR-KAMERAN	141
19	SLUTSATSER.....	141
20	FÖRDJUPAD FORSKNING OM ANGELÄGNA FORSKNINGSPROBLEM	144
21	REFERENSER	147

BILAGOR

1. Manual för användning av Siemens laserinstrument och FLIRs ThermoCAM™ GasFindIR LW
2. Technical Data for VOGUE Siemens AG, CT PS 8 Remote Natural Gas Leak Detector Field Unit
3. ThermoCAM™ GasFindIR LW
4. Valda undersökningsobjekt och deponiytor
5. Metoder att mäta koncentrationer och flöden av metangas
6. Fältobservationer, laserinstrumentet
7. Kammarmetodmätningar, resultat
8. Georesistivitetsmätningar, starttider för mätningarna vid samtliga linjer
9. Geoelektricitetsmätningar, koordinater för alla elektroder
10. Geoelektricitetsmätningar, tidssteg
11. Fjärranalys för statusbestämning av avfallsupplag energi och miljötillämpningar

1 **BAKGRUND**

1.1 Allmänt

Metan uppstår i vissa naturliga miljöer och vid antropogent skapade processer. Exempel på var metan uppstår i naturen är våtmarker och sjösediment, och exempel där mänskliga aktiviteter ger metanavgång är djurhållning, naturgasdistribution, avfallsupplag och eldning med fastbränslen.

Metan är en växthusgas som inverkar på energibalansen i lufthavet 22 gånger mera än koldioxid (Statens Energimyndighet, Naturvårdsverket, 2004). Även om de totala kvantiteterna av metangasemissionerna är 200 gånger mindre än koldioxidutsläppen i Sverige är det viktigt att reducera och hindra utsläpp av metan till atmosfären. Detta motiveras också bl.a. av att en viktig del av de människoalstrade källorna för metangasemissioner är lättare att åtgärda än t.ex. emissionskällorna till CO₂. Avfallsupplag bedöms vara en sådan källa (Crill, Riise, 2005).

Metanhalten i atmosfären har successivt ökat och var år 2005 uppe i 1774 ppb. Ökningen har avstannat och orsaken är inte känd. Det finns en säsongsvariation med högre halter på sensommar och höst (IPCC, 2007).

De totala antropogena CH₄-emissionerna i Sverige 2003 var ungefär 0,3 Mton (5,7 Mton CO₂-ekvivalenter i ett 100-års perspektiv), vilket är en minskning med 46 500 ton sedan 1990 (Naturvårdsverket, 2003). Avfallsupplagen i Sverige står för merparten av denna reduktion (Naturvårdsverket 2004, Crill, Riise, 2005).

Förutom påverkan på energibalansen i atmosfären vid utsläpp är metan brandfarlig och i vissa fall explosiv i blandning med luft. Dessutom, metan har ett stort energivärde och det är ekonomiskt intressant att ta om hand och använda som ett gasformigt bränsle för uppvärmning av byggnader, och för framställning av elektricitet eller som fordonsbränsle.

Metangas bildas tillsammans med koldioxid spontant i avfallsupplag med organiskt innehåll genom anaerob nedbrytning av organiskt material. Gasblandningen kallas i detta sammanhang deponigas.

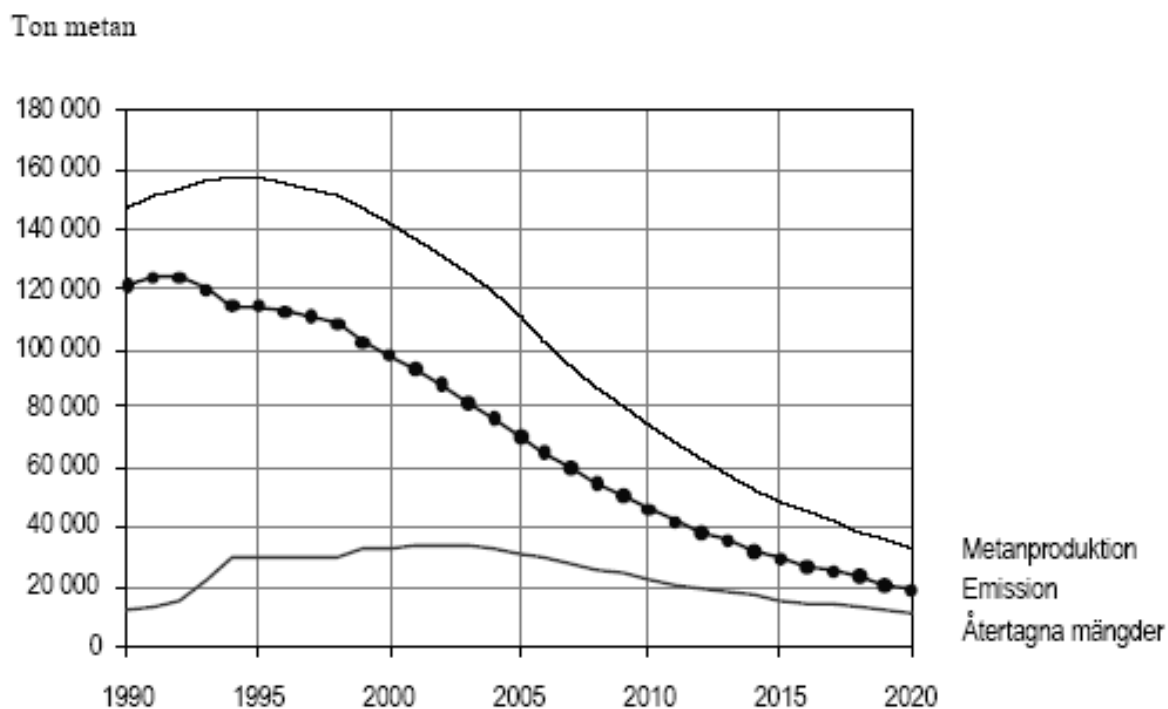
Deponering av avfall har varit en viktig avfallsbehandlingsmetod fram till förbudet mot deponering av brännbart (2002) och organiskt avfall (2005). Metoden att ta hand om avfall genom deponering har utvecklats efterhand från att vara enkel uppläggning utan miljöskyddsåtgärder till en kontrollerad metod där man lägger förbehandlat avfall i celler med barriärsystem för att minska miljöpåverkan. Emissioner i form av förorenat vatten (lakvatten) och deponigas skall enligt gällande regler i Miljöbalken tas om hand.

1.2 Problembeskrivning

Det är bara en liten del av den bildade deponigasen från avfallsupplagen i Sverige som tas om hand och används eller oskadliggörs på annat sätt. I Sverige har antalet kommunala upplag i drift minskat från ca 350 år 1994 till 175 stycken (Avfall Sverige, 2007). Antalet kommer att

minska ytterligare, det är framför allt små upplag som kommer att avslutas. Vid sidan av de kommunala upplagen finns ett antal industriupplag som tagit emot organiskt avfall. Det finns över 4 000 nedlagda avfallsupplag i Sverige, de flesta mycket små upplag.

Genom det stora antalet upplag finns det stora mängder organiskt material i upplagen i Sverige där deponigas bildas och kommer att bildas under lång tid. Den nuvarande situationen och till vilken storleksordning deponigas kommer att bildas i framtiden framgår av figur 1.1.



Figur 1.1. Metanbildning, emissioner och återtagna mängder från avfallsupplag i Sverige (Naturvårdsverket, 2001).

I övriga världen är läget ett annat. Sett i ett globalt perspektiv läggs mycket stora mängder avfall i deponier, och den sammanlagda mängden organiskt kol i deponier växer (IPCC, 2007). I sin tur beräknas mängden metan som avgår från deponier stiga, se tabell 1.1.

Tabell 1.1. Metanemission från världens avfallsdeponier 1996-2006, IPCC inventering, extrapolering, Mton CO₂-ekv.).

Källa	1990	1996	2000	2005	2010	2015	2020	2030	2050
Metan från deponier, a)	760	770	730	750	760	790	820		
Metan från deponier, b)	340	400	450	520	640	800	1000	1500	2900
Metan från deponier, c)	550	585	590	635	700	795	910		

a) Baserat på nationella beräkningar och för icke-rapporterande länder på inventering 1996 samt extrapolering (USEPA, 2006).

b) Baserat på inventering 2006 och BAU projection (Monni et al., 2006)

c) Medelvärde av de två övre inventeringarna

Den sammanlagda mängden metanemissioner från världens avfallsdeponier, i nuläget ca 650 Mton CO₂-ekv. utgör ca 2,5 % av det globala utsläppet av växthusgaser (green house gases, GHG).

I IPCCs senaste rapport 2007 (IPCC, 2007) visas också regionala variationer vad avser emissioner av metan från avfallsdeponier. Ökningen av emissionens storlek har minskat p.g.a. strängare lagstiftning och ökad användning av metangasen. Sammanlagt anses 105 Mton CO₂-ekv. nu tas omhand och användas för olika energiändamål.

I Europa minskar metanavgången från deponier såsom i Sverige, medan emissionerna från deponier i allt högre utsträckning kommer från utvecklingsländer i Afrika och Ostasien.

I IPCCs rapporter anges slutligen att mängder skadliga emissioner minskar när avfallshanteringen ändras från deponering till ökad återvinning ur avfall, ökad förbränning samt ökad användning av biogasen från deponierna.

1.3 *Behov av enkla kostnadseffektiva mätmetoder*

Eftersom avfallsdeponier utgör signifikanta utsläppskällor för metangas fordras mätmetoder för att bättre fastställa utsläppens storlek samt detektera var utsläppen sker så att åtgärder för att minska okontrollerad avgång av metan kan göras.

Sverige skall liksom övriga medlemsländer i EU numera varje år redovisa utsläpp till luft och vatten till European Pollutant Emission Register (EPER). Sverige har till EU redovisat för åren 2001 och 2004 och redovisning skall således ske för 2007. Redovisningen sker på nationell nivå, men även på anläggningsnivå. Ett fåtal deponianläggningar har redovisat beräkningar eller mätningar än så länge. Detta beror delvis på att tillgången på enkla mätmetoder saknas.

De metoder som finns tillgängliga för mätning av metanavgång från deponier är alla omständiga och kräver relativt stora resurser, se beskrivning av de olika metoderna nedan (kapitel 7). Kammarmetoden exempelvis, kräver en stor mängd delmätningar och de metoder som finns för mätning av emissionen från hela avfallsdeponier är dyra. Metoder för detektering av punktläckage är också få och relativt dyra.

Slutanvändaren har behov av träffsäkra, billiga och lätthanterlig mätteknik för att:

- kartlägga metanemissioner
- underlag för miljövärdering av deponier
- underlag för kort- och långsiktig planering av deponin
- underlag för kort- och långsiktig planering av emissionsbegränsande åtgärder
- utbildning.

2 SYFTE

Syftet med projektet är att detektera gasläckage, mäta och kvantifiera metangasemissionen från avfallsupplag. Det övergripande målet är att utveckla kostnadseffektiva metoder för att spåra och värdera metanutsläpp från avfallsupplagsytor i form av detaljerade emissionsdata ifrån läckagekällan, till översiktlig information av emissionsbilden över stora upplagsytor.

3 MÅL OCH FORSKNINGSPRÅG

Följande mål uppställs angående utrustning:

- Laser skall användas för att skanna översiktligt, detektera läckagekällan och kvantifiera metangaskoncentrationen ovan avfallsupplagsytor.
- IR-kamera skall användas för att detektera utsläppskällan (s.k. pinpointing) och visualisera metangasens rörelser och metangasavgången från upplagsytor.
- Kombinationen av mätningar med laser och IR-kamera skall kunna användas för att förbättra uttagssystem för deponigas.
- Kombination av laser och IR-kamera skall kunna användas för att bestämma deponigasavgång vid upplag med och utan uppsamlingssystem för deponigas. Emissionens storlek kan här variera inom vida gränser.
- Geoelektricitet skall användas i kombination med laser och IR-kamera med syfte att förstå gasrörelser i upplag och i gränssnittet mot atmosfären.

Mål för utvecklingen av mätmetodik:

- Att med utvald teknik utveckla en kostnadseffektiv metod för att detektera metanemissioner från avfallsdeponier.
- Att utveckla en metod som ger en översiktlig information om fördelningen av metanemissionen från en hel avfallsdeponi.
- Att ge detaljerad information (platsbestämning, uppmätta koncentrationer etc.) angående utsläppspunkterna på en avfallsdeponi.
- Att finna en kostnadseffektiv metod att kvantifiera total emission av metan en från avfallsdeponi.

Ett kompletterande mål har införts efter det att undersökningarna igångsatts:

- Kammarmetoden skall användas för att försöka kalibrera mätningar gjorda med laser för att kunna beräkna emissionens storlek.

De i projektet utvecklade metoderna skall kunna ge information om metankoncentrationer ovan upplagsytor, ge kunskap för att förbättra uttagssystemen för den bildade deponigasen, och ge information om upplagets emissionsstatus, som underlag för att åtgärda deponigasutsläpp.

4 HYPOTESER

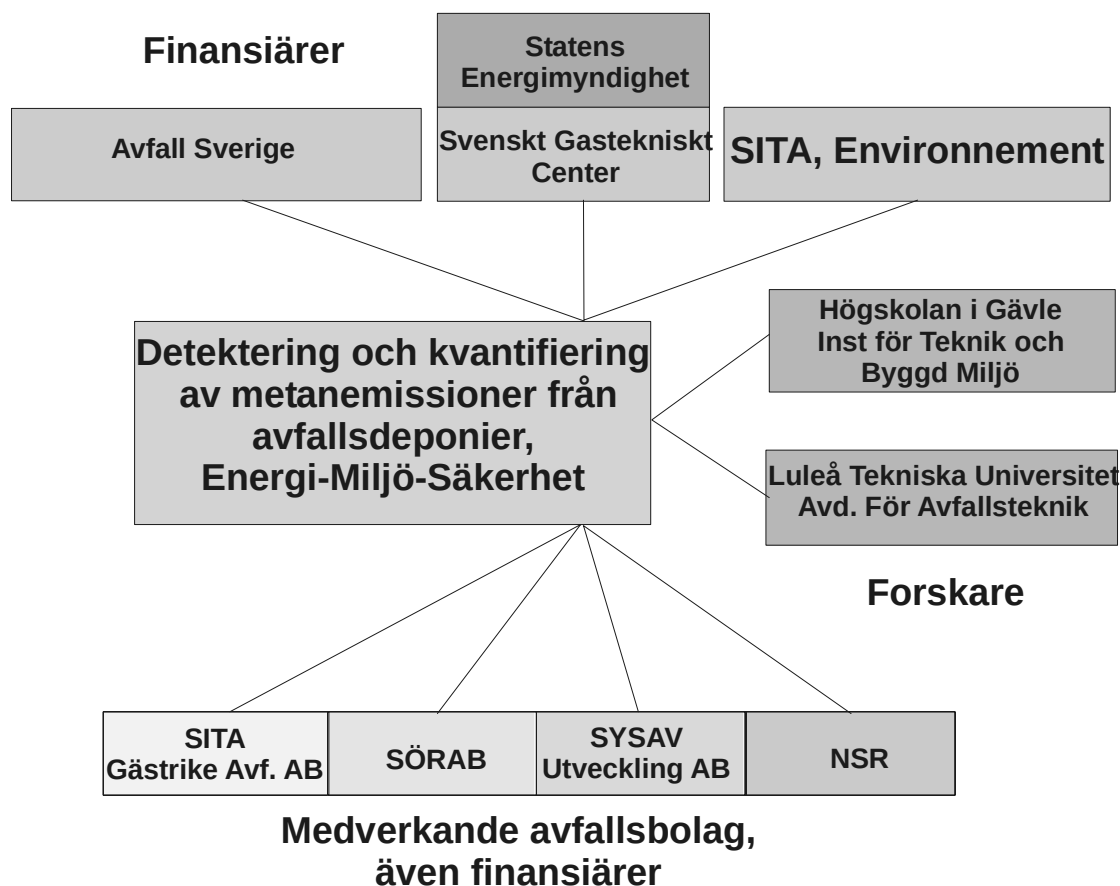
- Aktiv metangas-laser teknologi, som SIEMENS remote gas detection system, bör kunna användas för att detektera och indirekt kvantifiera metanemissioner från avfallsupplag.
- Högupplösande IR-teknologi bör kunna användas för att detektera och visualisera metangas och för att studera metangasens beteende och emission från ytan på avfallsupplag.
- Resultat från mätning av koncentrationen av metangas i kombination med information om lokaliseringen av metanläckagekällor, metangasens spridningsmönster och beteende bör ge kunskap som kan användas för att förbättra gasuttagssystem och minska metanemissioner från avfallsupplag.

- Förekomsten av låga metankoncentrationer över en deponiyta indikerar låga emissionsflöden, medan höga metankoncentrationer indikerar höga emissionsflöden.
- Kombinationen av gaskoncentrationsdata från lasermätningar och fältreferensdata från mätning med kammaremetod som input i en metanflödesmodell bör möjliggöra omvandling av laserdata till flödesdata i l/min.
- Kombinationen gaskoncentrationsdata från lasermätningar, flödesdata från kammar-mätningar, och geoelektricitetsmätningar för resistansmätning för detektering av förekomst och lokalisering av fuktförhållanden och metangasrörelser nere i en deponi bör sammantaget ge ökad kunskap om metanprocesser nere i en deponi och om metan-emissioner från deponiytor.

5 ORGANISATION

Projektet har inledningsvis diskuterats fram och beslutats av fyra avfallsbolag i Sverige. SITA Environnement har tillkommit som en värdefull partner för att framför allt leda in undersökningarna mot kvantifiering av metanemissionerna. Lokaliseringen av de fyra bolagen medför att metanemissioner under olika klimatförhållanden har kunnat studeras. Dessutom har medverkan från SITA Environnement tillfört att deponier i Frankrike också undersökts, med de betingelser som råder vid nordfranska deponier.

Projektet har styrts av en referensgrupp bestående av representanter från de medverkande bolagen, de bidragsgivande forskningsråden och forskare från Högskolan i Gävle och Luleå Tekniska Universitet. Organisationen framgår av figur 5.1.



Figur 5.1. Projektorganisation för "Detektering och kvantifiering av metanemissioner från avfallsdeponier.

6 KUNSKAPSLÄGET

6.1 Deponeringsstrategier

Genom att koncentrera avfallsprodukter till en deponi skapas en ackumulation av diverse ämnen såsom metaller, organiska ämnen och näringsämnen. Den höga koncentrationen av dessa ämnen ger skarpa gradienter av materia och kemisk energi mellan deponin och dess omgivning. Enligt termodynamikens andra huvudsats, om spontan ökning av entropin, kan det fastslås att deponin strävar efter ett jämviktsförhållande med omgivningen. Såvida inte det sker en kontinuerlig tillförsel av energi för att upprätthålla koncentrationen av materia och kemisk energi, är ett massflöde från deponin till den omgivande miljön oundvikligt i ett längre tidsperspektiv. Massflödet drivs av gradienterna och kommer att fortsätta tills dess att jämvikt mellan deponi och omgivning uppnås (Bendz et al., 1999).

Generellt sätt så innebär modern deponeringspraxis att en deponi avskärmas från omgivningen med botten och topptätning och att massflödet i form av lakvatten och biogas samlas upp och behandlas. Koncentrationen och kontrollen av ämnen bibehålls genom tillsats av energi.

Det finns i huvudsak två strategier för deponering. Enligt den första skall just alla koncentrationer av ämnen bibehållas genom att avfallet isoleras från omgivningen under mycket lång tid. Problemet är att det finns en spontan nedbrytning av organiska ämnen och en kemisk omvandling i övrigt. Enligt den andra skall avfallet bringas att omvandlas till mera ofarliga ämnen under en så kort tid att människan har kontroll över förloppet.

Den huvudsakliga skiljelinjen mellan olika deponeringsstrategier går just här och definieras av synsättet på deponins uppgift, konservering eller stabilisering av avfallet. Enligt det andra synsättet strävar man efter att optimera de variabler, framför allt en hög fukthalt, som styr nedbrytningen, vilket innebär att deponin kan liknas vid en bioreaktor där slutprodukten är en stabiliserad massa som kan integreras i miljön.

Deponin i en konserverande roll är införd i deponeringslagstiftningen från EU. Strategin har kombinerats med en successiv reduktion av det organiska innehållet i deponin med det främsta syftet att minska avgången av metangas från nedbrytningen av avfallet.

Deponering i kontrollerad form är en relativt ung teknik och inga långtidsobservationer finns att tillgå. Vår kunskap om deponiemissioner, huvudsakligen biogas och lakvatten, grundar sig på erfarenheter från nutida deponiers första 50 år. Man kan därför bara spekulera i hur lång tid som krävs för att en deponi skall nå jämvikt med omgivningen. Sådana spekulationer är egentligen centrala i diskussionen om hur en hållbar deponeringsstrategi skall se ut.

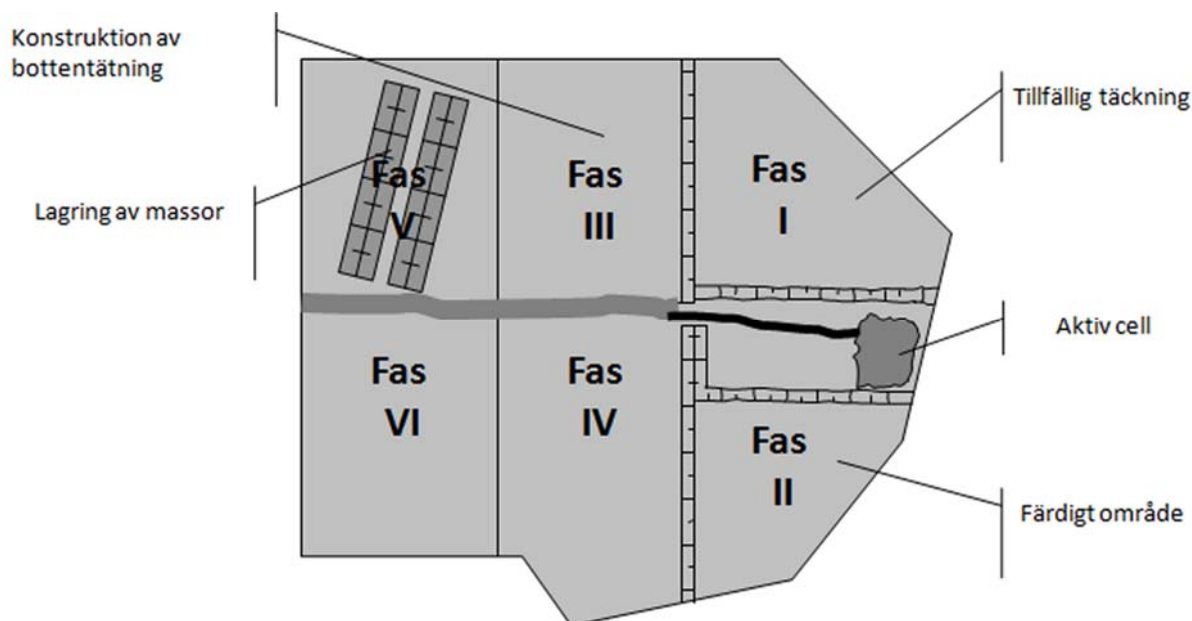
Det är viktigt att komma ihåg att oavsett den nuvarande trenden så måste vi hantera de deponier som konstruerades enligt gårdagens lagstiftning (Knox, 1996). Majoriteten av alla deponier i Sverige t.ex., utgörs av denna typ.

6.2 Deponins konstruktion

Avfallsdeponin är en struktur byggd av det inkommande avfallet, placerat på en botten tätning på vilken lakvattnet uppsamlas och leds bort för behandling. Uppbyggnaden sker vanligtvis i

s.k. pallar, 2-3 m höga. På varje pall läggs daglig täckning för att minska kringblåst av avfall och lukt. Den totala höjden av en deponi beror på deponins storlek men är vanligtvis 10-30 m, och kan i enstaka fall uppgå till 45-50 m i Sverige. Efter det att deponin är helt fylld läggs en slutlig tät täckning över hela överytan. På detta sätt minimeras utläckande mängd kontaminerat vatten. Någon inneslutning som hindrar gasemissioner krävs ej.

Vanligtvis görs deponeringen i flera avsnitt eller celler, så att den slutliga täckningen kan läggas på så tidigt som möjligt. Figur 6.1 visar översiktligt uppdelningen i områden med påbörjad bottentätning, celler i drift, och avslutade celler.



Figur 6.1. Uppbyggnad av en avfallsdeponi, med olika faser av färdigställande.

6.3 Nedbrytningsprocessen

Den typiska deponin innehållande blandat avfall inklusive organiskt material kan liknas vid en anaerob reaktor utan omblandning med ett stort vattenunderskott, där nedbrytningsprocessen följaktligen är ineffektiv (Bogner et al., 1993; El-Fadel, 1996, 1997). Den spatiella variationen av vatteninnehållet är stor och varierar från mättade till torra förhållanden. Vid utgrävningar av äldre deponier har stora volymer visat sig vara helt torra och avfallet i stort sett opåverkat av nedbrytning (Harris, 1979, Hogland et al., 1995). Förhållanden för nedbrytning är långt ifrån optimala vilket gör att endast en del av det organiska kolet kommer att konverteras och avgå i form av metan eller koldioxid. Delar av det organiska materialet är också svårnedbrytbart och bryts endast delvis ned, även på lång sikt (IPCC, 2007).

Vår kunskap och antaganden om de anaeroba processerna i deponier bygger på erfarenheter från rötningsreaktorer. Med undantag av att miljöbetingelserna i en rötreaktor är styrda så att den anaeroba nedbrytningsprocessen är betydligt bättre optimerad så är den mikrobiologiska

miljön liknande även om substratets relativa innehåll av fett, proteiner och kolhydrater kan variera (El-Fadel et al., 1997).

Det organiska materialet bryts ned i tre steg, hydrolys och fermentation, acetogenesis och metanogenes, till i huvudsak metan och koldioxid (Christensen och Kjeldsen, 1989). Innan mikroorganismerna kan bryta ned det organiska materialet så måste det spjälkas och lösas upp. Detta sker i ett hydrolyssteg, vilket är det första steget i den anaeroba nedbrytningen. På detta sätt konverteras det organiska materialet först till enklare polymerer såsom proteiner, kolhydrater och lipider vilka i sin tur hydrolyseras till aminosyror, socker och fettsyror. Dessa fermenteras sedan antingen till flyktiga fettsyror eller direkt till ättiksyra (El-Fadel et al., 1997). Hydrolysen är troligtvis begränsande för hela processen (Leuschner och Melden, 1983) vilket också har indikerats vid simulering med mikrobiella tillväxt/biogasbildnings modeller (El-Fadel et al., 1996). Vatten är inte bara nödvändigt för hydrolysen utan också för att omfördela kemiska substanser, mikroorganismer och näringsämnen inom deponin (Augenstein och Pacey, 1991; Christensen och Kjeldsen, 1989). Därför har både hög vattenhalt (Ehrig, 1991) och vattenomsättning (Klink och Ham, 1982) visat sig stimulera nedbrytningsprocessen. Vidare har en hög temperatur visat sig ha en gynnsam inverkan på hydrolyshastigheten (El-Fadel et al., 1996). I det andra steget transformerar acetogena bakterier fermentationsprodukterna till ättiksyra, väte och koldioxid och i det sista steget producerar metanogena bakterier metan. Det kan också ske genom bildning av väte som sedan transformeras till metan.

Efter hydrolysen blir metanogenesen den begränsande processen för nedbrytningsprocessen, följaktligen kommer de faktorerna som styr hydrolysen och metanogenesen att dominera i nedbrytningsprocessen och bildningen av biogas.

Från tidpunkten för deponeringen går således avfallet igenom ett antal nedbrytningsfaser vilka kommer att styra emissionerna. En idealiserad detaljerad anaerob nedbrytningssekvens kan delas in i fem faser enligt följande (Christensen et al., 1989; Ehrig, 1987; Farquhar och Rovers, 1973):

1. Efter deponeringen kommer aeroba förhållanden att råda under en kort tid. Under denna fas kommer lättnedbrytbart biologiskt material att komposteras till i huvudsak vatten och koldioxid under det att syre och kväve förbrukas.
2. När den syremängd som stängts inne i avfallsmassorna förbrukats kommer fakultativa och acetogena bakterier att bli aktiva vilket betyder att nedbrytningsprodukter som flyktiga fettsyror (VFA), koldioxid och vätgas kommer att bildas. Effekten av de organiska syrorna blir att pH sänks vilket verkar inhiberande för metanogena bakterier. Lakvattnet utmärks genom höga koncentrationer av kemiskt syreförbrukande substans (COD), kalcium, järn, tungmetaller och ammoniak.
3. Under denna fas sker en långsam tillväxt av metanogena bakterier och VFA konverteras till metan och koldioxid. Allt eftersom VFA koncentrationen sjunker höjs pH, koncentrationen av järn, tungmetaller och COD avtar.
4. Detta är den stabila metanproducerande fasen som slutar när all VFA konverterats och endast det svårnedbrytbara organiska materialet återstår. Metangasproduktionen fortsätter med reducerad intensitet.
5. Slutligen kommer metangasproduktionen att ha sjunkit till en nivå där syre från atmosfären kan diffundera in.

I realiteten finns flera faser närvarande i en avfallsdeponi med organiskt innehåll samtidigt. Det innebär i sin tur att gasbildningen kan vara olika stor i olika delar av deponin, samt att förändringar hela tiden sker.

El-Fadel et al. (1997) presenterade en sammanställning av faktorer som påverkar gasproduktionen och den anaeroba nedbrytningsprocessen från deponier, tabell 6.1. Datan bygger på ett stort antal studier som publicerats under de sista 20 åren. De olika variablerna interagerar i stor utsträckning med varandra och att separera denna samlade effekt från påverkan från den enskilda faktorn är svårt (El-Fadel, 1997; Gurijala et al., 1997).

Tabell 6.1. Faktorer som influerar biogasproduktionen (efter El-Fadel, 1997, Bendz et al., 1999).

Faktor	Stimulerande av produktionspotential			Hämmande av produktionspotential		
	Låg	Medium	Hög	Låg	Medium	Hög
Sammansättning		+		-		
Densitet	+					
Partikelstorlek	+					
Temperatur		+			-	
pH		+		-		
Näring	+			-		
Mikrober	+			-		
Fukthalt			+			
Syre						-
Väte	+			-		
Sulfat				-		
Miljögifter					-	
Metaller				-		

Tillväxten av mikroorganismer är i hög grad beroende av den yttre temperaturen eftersom mikroorganismer inte har någon möjlighet att reglera sin egen interna temperatur. Allmänt gäller att mikrobiell tillväxt sker i temperaturspannet 20-45 °C för mesofila processer och 50-65 °C för termofila processer. För låga temperaturer är i motsats till för höga temperaturer sällan dödliga. Som tidigare nämnts så spelar temperaturen även en stor roll för hydrolysen.

Jämfört med de fermenterande och acetogena bakterierna så är den metanogena bakterien känslig för pH värdet och klarar endast av pH värden mellan 6-8.

Om deponin betraktas som en helhet råder det inte brist på de viktigaste näringsämnena kväve och fosfor, men p.g.a. av heterogeniteten hos deponerat avfall kan näringsbrist vara en begränsande faktor lokalt i deponin (Christensen och Kjeldsen, 1989).

Fukthalten är den enskilda parameter som har störst betydelse för den anaeroba nedbrytningsprocessen (Augenstein och Pacey, 1991; Bogner och Spokas, 1993; Christensen och Kjeldsen, 1989; Ehrig, 1991; El-Fadel et al., 1996; Gurijala et al., 1997; Klink och Ham, 1982) Förutom av de anledningar som tidigare nämnts så kan en låg fukthalt innebära en lokal ackumulering av ämnen som kan ge en inhiberande effekt. Frånvaron av syre är grundläggande för tillväxt av anaeroba bakterier.

Gurijala et al. (1997) utvärderade den samlade effekten och det enskilda bidraget av 10 stycken olika faktorer betydelse för metangasproduktionen genom en multipel regressionsanalys av data från 38 prover av MSW, vilka tagits vid Fresh Kills Landfill, New York. En enkel korrelationsanalys bedömdes både vara missvisande och otillräcklig eftersom faktorernas samverkan är betydelsefull. Analysen visade att fukthalt, halt av lättnedbrytbart organiskt material, sulfat och cellulosa/lignin-kvoten var de variabler som hade en signifikant betydelse för metangasproduktionen. De övriga sex variablerna gav inte något signifikant bidrag i närvaro av de förstnämnda fyra. Vatteninnehållet är den variabel som har störst betydelse för metangasproduktionen. Analysen indikerade att metangasproduktionen stimuleras vid en fukthalt över 55 % (vikt) och upphör vid en fukthalt under 33 % (vikt). Innehållet av lättnedbrytbart organiskt material visade sig vara den näst viktigaste variabeln som har en positiv inverkan, men det finns även indikationer på att en alltför hög halt av lättnedbrytbart organiskt material kan verka hämmande. Den tredje viktigaste variabeln var SO_4^{2-} , vilken påverkar metangasproduktionen negativt. Slutligen cellulosa/lignin-kvoten befanns vara negativt korrelerad till metangasproduktionen.

Uppgifterna på storleken av andelen organiskt kol som bryts ned varierar i litteraturen men enligt en sammanställning av Bogner och Spokas (1993) ligger den i storleksordningen 25-40 % av den totala mängden. Klart är att den största delen av det organiska kolet kommer att stanna kvar i deponin i analogi med ett sedimentärt geologiskt lager (Bogner och Spokas, 1993; Richards, 1989).

6.4 Emissioner

6.4.1 Allmänt

Nedbrytningsprodukterna ger upphov till emissioner till luft, mark och vatten. Utsläpp till mark och vatten sker genom att främst nederbördsvatten infiltrerar in i deponin, och sedan lakar ut nedbrytningsprodukterna från processerna som beskrivits ovan, samt till del också oorganiska ämnen som finns i avfallet. Emission till luft består, som ovan beskrivits, av en gas, som vanligtvis benämns biogas, men i detta sammanhang kan kallas deponigas.

6.4.2 Lakvatten

Lakvattenbildning, dess omhändertagande samt rening av lakvatten är ett omfattande ämnesområde som lämnas utanför denna studie. En viss beskrivning är dock befogad eftersom lakvattenuppsamlingssystemets utformning kan innebära oönskat gasläckage.

Den främsta miljöskyddsåtgärden som normalt utförs vid en avfallsdeponi utgörs av en bottentätning samt ett lakvattenuppsamlingssystem. Det lakvatten som samlas upp leds ut ur deponin till någon typ av behandling. Lakvattenuppsamlingssystemet består av ett dräneringslager som läggs ovan bottentätningen, med ca 0,5 m tjocklek. För att lakvattnet som sipprar ned från avfallet som ligger ovanpå skall ledas undan läggs dräner i dräneringslagret, vanligtvis perforerade plaströr. Ett uppsamlingssystem består av dräner, grenledningar och huvudledningar som leder lakvattnet ut ur deponi. Alla dräner och ledningar ligger med fall som underlättar av lakvattnet.

Lakvattenuppsamlingssystemet kan innebära att ledningarna leder även gas ut ur deponin. Detta kan undvikas genom installation av vattenlås.

6.4.3 Deponigas

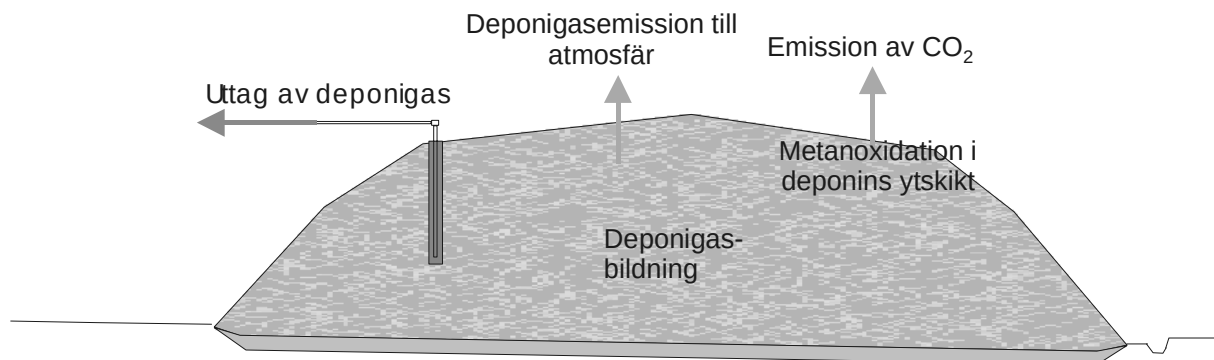
Förutsättningarna för gasbildningen i en deponi har beskrivits ovan. Från emissionssynpunkt är den viktigaste kunskapen den totala gasbildningens storlek samt tidsförloppet. Från total emissionssynpunkt är det dessutom viktigt att veta när gasemissionen upphör helt samt tidpunkten när gasuppsamling kan tänkas avbrytas.

Deponigasen har en sammansättning med 40-60 % metan och 60-40 % koldioxid. Vissa andra gaser finns också i små mängder. Metan har en volymvikt av $0,71 \text{ kg/m}^3$ och koldioxid $1,62 \text{ kg/m}^3$.

Genom nedbrytningen genereras hela tiden, efter en kort starttid, ett gasformigt gasutsläpp i form av metan och koldioxid. Gasflödena framgår av figur 6.2.

Massbalansen beskriver kortfattat att deponigas bildas, kan tas om hand, oxideras i deponins ytskikt eller emitteras till omgivningen.

Av massbalansen och kunskapen om metanoxidationens storlek är det uppenbart att uttagets storlek är direkt avgörande för hur stor emissionen blir. En tät täckning ovanpå deponin gör det lättare att samla in deponigasen eftersom luft inte så lätt sugas in i deponi. Men om inte uttag görs så kommer deponigasen ovillkorligen att läcka ut.



Figur 6.2. Flöden av deponigas från en avfallsdeponi (IPCC, 2007).

En balansekvation kan ställas upp:

$$G_b = G_e + G_o + G_r$$

Där

G_b = gasbildning

G_e = deponigasavgång till atmosfären

G_o = den del av deponigasen vars metan oxideras till CO_2 i deponins ytskikt

G_r = deponigasuttag

6.5 Sättningar

Sättningar har betydelse för hur en deponi uppför sig från gasemissionsynpunkt. De beror framför allt på tre processer (Huitric, 1981):

- *Konsolidering* är en process som uppstår när vatten som finns i avfallets porer pressas ut ur avfallet på grund av en ökad belastning. En sådan belastning kan t.ex. vara överliggande avfall, topptätning, maskiner etc. Detta innebär att konsolideringsfasen är en process som i princip enbart pågår under drifttiden, eftersom det inte sker någon ökad belastning uppifrån efter det att full höjd nåtts (Wall och Zeiss, 1995). En viss fördröjning finns dock i processen eftersom det urpressade porvattnet inte alltid kan transporteras bort på grund av avfallets låga permeabilitet.

- *Krympning* i avfall beror på volymminskningen av fast material som uppstår när organiskt material omvandlas till biogas och vatten (Huitric, 1981). Krympningen pågår i princip så länge som det finns tillgängligt organiskt material kvar i avfallet. Detta kan pågå under flera decennier. Krympning tillsammans med kompaktion är de processer som bidrar mest till sättningar i avfall.

- *Kompaktion* beror på att det på att det hela tiden sker omlagringar av avfallet inne i deponin. Omlagringarna beror främst på att avfallets struktur förändras på grund av att fast organiskt material omvandlas till gas och vatten. Det fasta skelett som sedan finns kvar utsätts då för en högre belastning som till slut medför att strukturen kollapsar. Kompaktionen beror även på att hålrum uppstår när det organiska materialet brutits ned. Hålrummen fylls sedan med små partiklar från nedbrytningen ovanför (Edil, Ranguette et al., 1990). Denna process medför att avfallet blir mer kompakt och permeabiliteten för gas och vatten minskar.

Sättningsmodeller för avfall bygger på geotekniska teorier som anpassats för de förhållanden som råder i deponier. Flera sättningsmodeller använder samma förutsättningar som gäller för beräkning av sättningar i torv, dvs. organiska jordar (Edil, Ranguette et al., 1990; Landva och Clark, 1990; Morris och Woods, 1990). Det som framför allt skiljer avfall från de flesta jordar, är att avfallet innehåller en stor mängd organiskt material som bryts ned under lång tid. Torv har liksom avfall ett högt innehåll av organiskt material samt innehåller en stor andel hålrum som snabbt sammanpressas vid belastning (Bendz et al., 1999).

Modellerna är i regel uppbyggda för att ta hänsyn till de tre processer som beskrivits ovan. Detta innebär att man ofta bygger upp modeller som delar in sättningsförloppet i tre faser, initiell, primär och sekundär fas (Boutwell och Fiore, 1995; Wall och Zeiss, 1995).

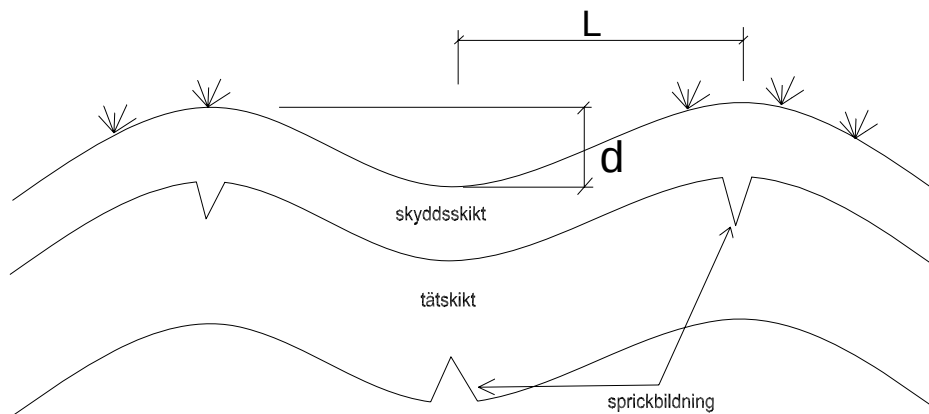
Den initiella fasen sker mycket fort, oftast inom ett par veckor efter att avfallet belastats. Den initiella fasen domineras av omlagringar som sker i avfallsmassan där de största hålrummen pressas samman (Wall och Zeiss, 1995). Den primära fasen domineras av konsoliderings-sättningar. I det skedet är det mindre porer som är fyllda med porvatten som pressas samman. På grund av att porvattnet ger ett visst motstånd mot sammanpressningen pågår den sekundära fasen något längre tid än den initiella fasen (Morris och Woods, 1990). Båda faserna pågår dock under drifttiden då man fortfarande lägger på nytt avfall, därför leder de vanligtvis inte till några driftsproblem. Den sekundära fasen domineras av volymförluster som beror på omvandling av fast organiskt material till biogas och vatten. Eftersom den sekundära fasen är så beroende av den organiska nedbrytningen, varar den så länge som det fortfarande finns nedbrytbart organiskt material kvar i deponin.

Den forskning som genomförts tyder på att sättningarna i ett avfallsupplag som innehåller hushållsavfall sätter sig mellan 10-50 % (Huitric, 1981; Stearns, 1987; Van Meerten, Sellmeijer et al., 1997). Av detta härrör ca 5-30 procentenheter från den initiella och primära fasen (El-Fadel, Findikakis et al., 1997). Nedbrytning av det organiska materialet, som dominerar den sekundära fasen, kan teoretisk stå för en sättning på ca 40 procentenheter. I praktiken är det dock inte troligt att nedbrytning står för mer än 25 procentenheter (Huitric, 1981).

Eftersom det är den sekundära fasen som orsakar de problem som uppstår med sättningar är det denna fas som borde vara mest intressant att undersöka. På grund av det utdragna tidsförloppet är det dock svårt att finna tillförlitliga dataserier över sättningsförloppet. Det är även svårt för enskilda forskare att driva projekt på så lång sikt. Detta innebär att få modeller har kunnat verifieras på lång sikt.

Det är egentligen av större vikt att bestämma storleken på de ojämna, differentiella, sättningarna än den totala sättningen, eftersom det är de differentiella sättningarna som orsakar problem vid sluttäckning av deponier. Problemen som uppstår är ansamlingar av vatten i lokala försänkningar, vattenlås i gasledningar, deformerade konstruktioner ovanpå deponin, deformationer i topptätningen m.m.

Deformationerna kan orsaka dragpåkänningar i tätskiktet. Dessa dragspänningar kan orsaka försämrade egenskaper eller i vissa fall t.o.m. brott i tätskiktet. Flera undersökningar har utförts där man undersökt tätskiktets hydrauliska konduktivitet vid olika dragpåkänningar. För att få enkla jämförbara siffror brukar man redovisa resultaten vid en s.k. distorsionskoefficient. Distorsionskoefficienten definieras som differentiella sättningen d , mellan två punkter delat med avståndet L , (Jesionek, Dunn et al., 1995), se figur 6.3.



Figur 6.3. Differentiella sättningars påverkan på tätskikt av lera (Bredariol, Martin et al., 1995). Områden med uppsprucket och tunt täcklager utgör läckagevägar för deponigasläckage.

Undersökningar i laboratorium har visat att egenskaperna för kompakterad lera försämras mest av de vanliga tätskikten vid dragpåkänningar. Vid en distorsionskoefficient på mellan 0,05-0,1 har en tydlig sprickbildning noterats. Detta motsvarar alltså en differentiell sättning på 5-10 cm per meter. Vid ett försök där en kaolinitlera utsattes för en dragpåkänning motsvarande en distorsionskoefficient på 0,1 ökade den hydrauliska konduktiviteten från 1×10^{-9} m/s till 1×10^{-5} m/s (Jessberger och Stone, 1991), en permeabilitet som motsvarar fin

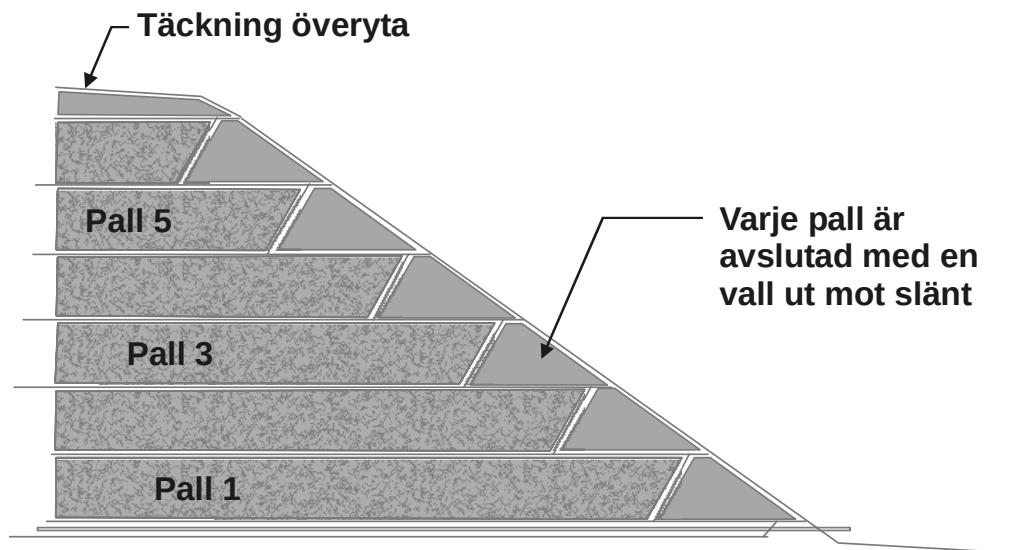
sand. Liknande undersökningar har utförts på geosyntetiska lerliners (GCL). Dessa utsattes för en dragpåkänning som var ca 20 gånger högre än den som lerlinern utsattes för, utan att någon signifikant ökning av den hydrauliska konduktiviteten kunde observeras (LaGatta, 1992; Daniel and Scranton, 1996).

Differentiella sättningar och skador som uppstår i samband med dessa ger läckagevägar för biogasen i en deponi. Gasläckaget blir koncentrerat till sprickor av olika slag däribland differentiella sättningssprickor, men även torksprickor i t ex täcksikt av lera. Torksprickorna är också ofta permanenta, dvs. de sluter sig och öppnar sig beroende på fukthalten i leran.

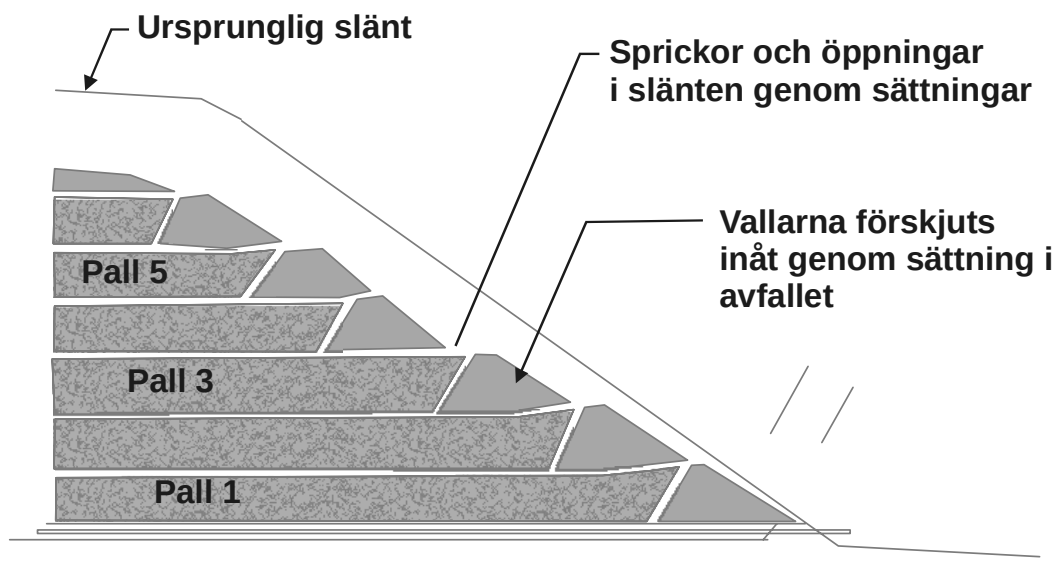
Extra kompaktering direkt före täckning med extra tunga fordon eller dynamisk kompaktering, att använda ett tjockare skyddsskikt som kan utjämna lokalt kraftiga differentiella sättningar, att använda geonät för att förstärka tätskiktets motståndskraft mot deformationer minskar differentiella sättningar och dess verkningar.

När en deponis höjd minskar genom sättningar av de slag som beskrivits ovan innebär det en sjunkning av överytan, men även att lutningen på deponins slänter minskar. Om en deponi byggts upp med vallar på varje pallplan kommer sättningarna att påverka de yttre vallarnas stabilitet och då påverkas även täckningen på slänterna, sprickor och öppningar uppstår.

Figur 6.4 illustrerar var sprickor och påverkan på täckningen sker.



Profil



Profil

Figur 6.4. Förändring av slänt efter sättning vilket orsakar sprickor och öppningar och möjlighet till biogasläckage från deponin. Läckaget förstärks av att genomsläppligheten för gas i avfallet är större i horisontell led jämfört med vertikalt.

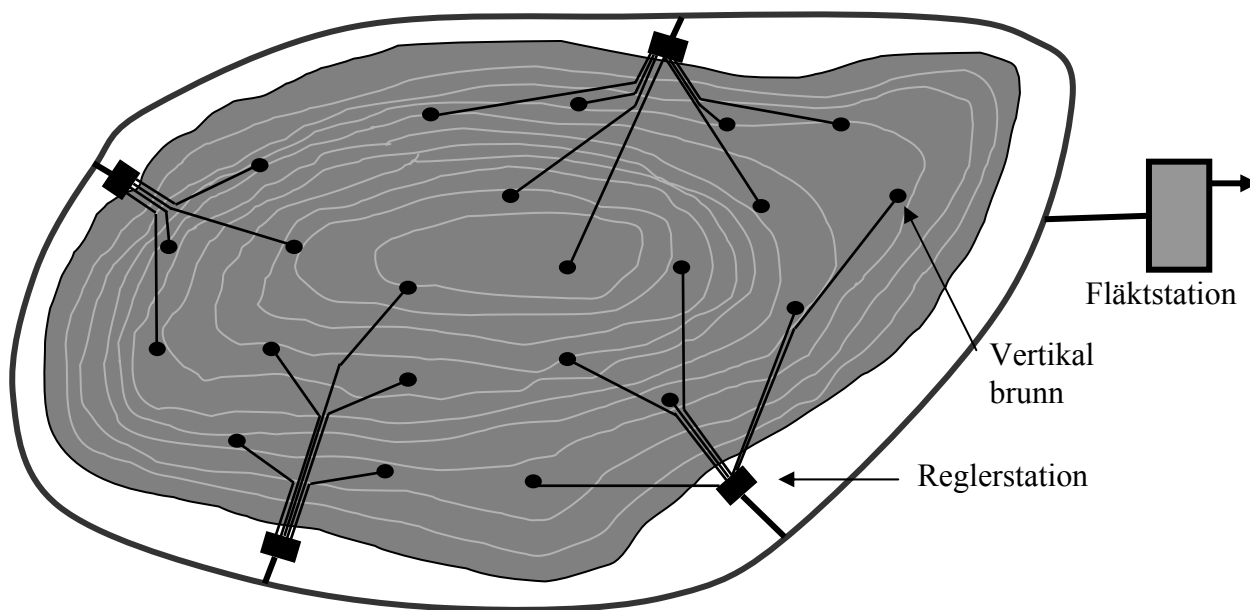
6.6 *Uttagssystem för deponigas*

Åtgärder som anses kunna minska deponigasläckaget från avfallsupplagen är (Börjesson et al., 2000):

- Förbjuda deponering av organiskt avfall, vilket medför att genereringen av deponigas på sikt kommer att minska väsentligt. Detta är redan genomfört genom deponiförbuden 2002 och 2005.
- Täckning av avfallsupplag. Denna åtgärd pågår eftersom ett stort antal avfallsupplag utan tillräckliga miljöskyddsåtgärder måste avslutas senast år 2008, och att täckning därefter måste påföras.
- Uppsamling, användning eller oskadliggöra metangasen genom förbränning. I dagsläget finns det 70 anläggningar med deponigasuppsamling i Sverige. Figur 6.5 visar schematiskt utformningen av ett gasuttagssystem vid en deponi.

Införande av ett aktivt uttagssystem för deponigas med vertikala brunnar eller horisontella gasdräner är den enskilt största åtgärden som kan göras för att minska metanemission från redan existerande avfallsdeponier. Fältstudier på ett flertal olika system och med olika handhavande har visat att 90 % av den bildade deponigasen kan tas om hand på deponiceller som har slutlig täckning och ett tillräckligt dimensionerat uttagssystem (IPCC, 2007). Deponier med mindre effektivt uttagssystem eller bara delvis utförda system, och att systemet sätts igång sent innebär att uttagseffektiviteten blir så låg som 20 %. Detta talar för att uttagssystemet skall sättas igång tidigt. Installation av horisontella gasdräner under uppfyllnaden av avfallet, frekvent inställning av systemet, avläsning av effektiviteten, åtgärdande av läckor vid uttagssystemet, täckning av avfallet är åtgärder som alla leder till mindre deponigasutsläpp.

För närvarande används deponigasen för uppvärmningsändamål i konventionella gaspannor, eller för att producera elektricitet. För att överföra energin till elektricitet används kolvmotorer, gasturbiner eller ångturbiner. I enstaka fall uppgraderas deponigas och används som fordonsbränsle. Här finns dock barriärer som främst är ekonomiska, men också vissa tekniska. Användning av deponigasen för framställning av elektricitet och fordonsgas kräver deponigas med hög metanhalt, vilket påverkar ett högt uttag av deponigasen. Om t.ex. en metanhalt på 50 % krävs så medför reglering av uttaget till 50 % metanhalt ofta att läckaget blir större i delar av en deponi där metanhalten är låg eftersom denna gas inte kan användas.



Figur 6.5. Exempel på ett gasuttagssystem.

Gasuttaget regleras i reglerstationerna. En undertrycksfläkt i fläktstationen förser uttagssystemet med ett undertryck tillräckligt för att suga deponigasen till fläktstationen och vidare till användning eller fackling.

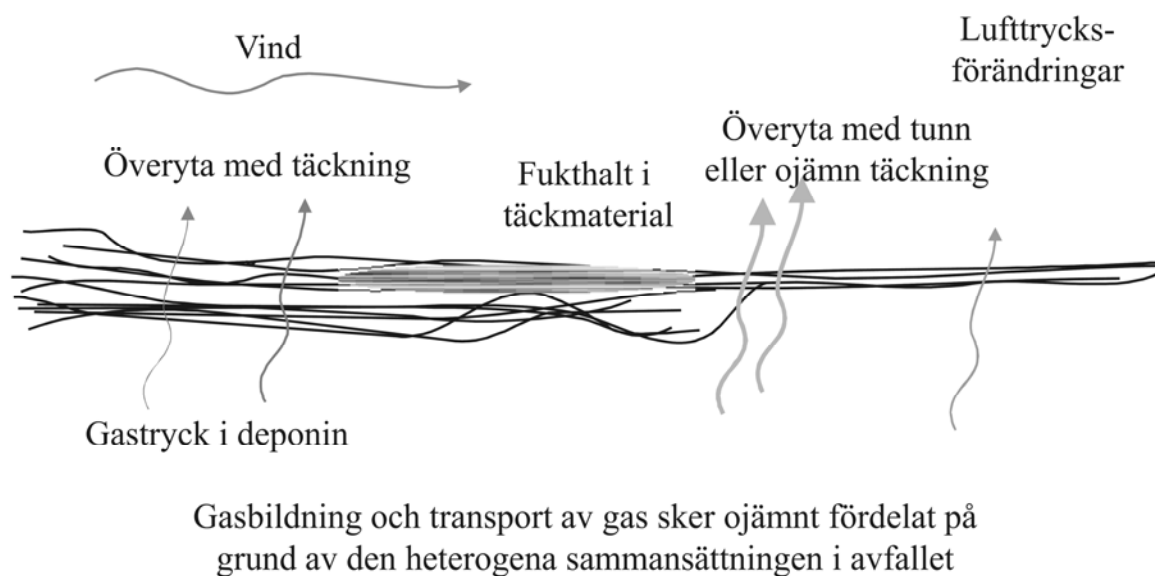
Denna allmänna inledning ger en bild av att uttag av deponigas är relativt lätt att utföra och sköta. En mängd försvårande omständigheter finns dock:

- Under driftfasen tillförs nytt avfall hela tiden. Det betyder att nya delar av gasuttagssystemet måste tillföras systemet, de nya delarna består av: uttagsbrunnar, dränsystem, stamledningar, reglerstationer, pumpkapacitet, samt anläggningsdelar där deponigasen används. Vid en aktiv deponi är oftast någon av dessa delar under utbyggnad.
- De dräner och brunnar som installeras har begränsad livslängd. Installationerna utsätts för stora påfrestningar genom de sättningar som deponin undergår, ledningar får då vattenlås och gasen kan inte transportas till pumpstation och energianläggningar. Ansamlingar av vatten i deponin gör att brunnar ibland blir vattenfyllda och satta ur funktion.
- Ett deponiuttagssystem är mycket dynamiskt vad avser flöden och tryck i olika delar av systemet, och måste därför regleras och balanseras ständigt.

I realiteten innebär dessa styrningssvårigheter att läckage i stort sett är ofrånkomligt. I enstaka fall har 100 % uppsamling av deponigasen rapporterats (Lagerkvist, 1996) vid mycket väl avgränsade deponiceller. Oftast uppnås en uppsamling mellan 50 till 75 %.

6.7 Deponigasens rörelser

Översättning av koncentrationsdata till flöde från deponin är svår att göra. För att förstå möjligheter och svårigheter måste en beskrivning över hur utflödet av deponigas ur deponin sker. Inledningsvis kan sägas att det är många variabler som påverkar hur stort utflödet av deponigas blir (figur 6.6).



Figur 6.6. Olika variabler som påverkar flöde av deponigas genom deponiytan.

Variablerna i figuren samt förändringar i tiden gör att enbart koncentrationmätningar är svåra att tyda. En översättning till flöde ut från deponin är än mera komplicerad.

En deponi är ett system som består av en fast fas, en porvolym (volymen mellan den fasta fasens partiklar) där gas kan röra sig samt en vätskefas. Vätskan består av vatten som antingen är bundet till avfallet, den fasta fasen, eller är rörligt och finns i porsystemet. En viss mängd vatten är också kapillärt bundet till porsystemet.

Den deponigas som bildas i avfallet är hänvisat till deponins porsystem. Porsystemet omfattar både små och stora porer, som antingen är öppna eller slutna. Deponigasen behöver en gradient för att röra sig, det kan antingen vara en tryckgradient eller en koncentrationsgradient.

Tryckgradient

Gasgenereringen och sättningar skapar ett tryck i en deponi vilket medför att det blir en tryckskillnad mellan deponin och atmosfären, ett differensstryck uppstår. Ett uttagssystem för deponigas använder ett undertryck för att leda deponigasen ut ur deponin till en gasanläggning. Tryckförhållandena i deponin förändras därigenom.

Koncentrationsgradient

Diffusion är en gas naturliga tendens att vilja uppnå en likformig koncentration i rummet. Gasen i en avfallsdeponi rör sig således från områden med hög koncentration (t.ex. av metan) till områden med lägre koncentration. Eftersom koncentrationerna av både metan och koldioxid är högre i en avfallsdeponi än i atmosfären utanför deponin diffunderar dessa gaser ut från deponin (O'Leary, Walsh, 1995).

Eftersom deponigasen som alstras fyller porvolymen med ny gas alstras ett tryck som pressar ut gasen ur deponin. Under deponins drifttid då det hela tiden påförs avfall innebär avfallets tyngd att porvolymen successivt blir mindre och ett tryck alstras.

En tryckgradient skapas också genom att gasen sugas ut ur deponin genom gasuttagssystemet (aktivt gasuttagssystem, se ovan). En viktig fråga är hur långt undertrycket når ut från uttagssystemet. I uttagssystem som använder vertikala brunnar brukar det anges att en brunn når 1,5 ggr brunnsdjupet.

Gasrörelser sker lättare horisontellt än vertikalt beroende på att avfallet skiktas vid uppläggningsen, kompaktering sker horisontellt i plan och avfallet blir på det sättet mera komprimerat och ogenomsläppligt i vertikal led. Gaspermeabiliteten är upp till 10 ggr större horisontellt jämfört med vertikalt (O'Leary, Walsh, 1995).

Tryckgradienten kan också innebära att gasen avgår ur deponin via lakvattenuppsamlings-systemet, om ledningar för lakvatten leder direkt ut mot atmosfären.

7 ÖVERSIKT ÖVER ETABLERADE MÄTMETODER

7.1 Allmänt

Det finns ett stort antal metoder för att mäta metangas. Vilka metoder som är användbara i en viss situation beror mycket på vilka kriterier som uppställs. Den som driver och ansvarar för en avfallsdeponi har specifika kriterier och det kan finnas kriterier som uppställs av myndigheter av olika skäl.

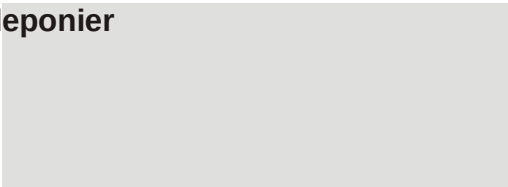
Några kvalitativa eller kvantitativa utsläppsgränser har ännu inte uppställts från myndighets-håll i Sverige.

Teknik och metoder för detektering och kvantifiering av metan från avfallsdeponier kan delas upp enligt följande (Envirotech Engineering, 2007):

1. Metoder för upptäckt av punktutsläpp, koncentrationsmätning.
2. Metoder för kvantifiering av läckagestorlek.
3. Metoder för områdesmätning, både läckdetektering och kvantifiering.

Det kan sägas att metoderna för upptäckt av punktutsläpp är de som tagits fram inom naturgas- och petroleumindustrin för att mäta främst läckage från huvudledningar (primärnät) och lokala ledningsnät (sekundärnät). De mätmetoder som finns för mätningar över stora områden täcker delar av eller hela deponin.

Mätmetoderna framgår av uppställning i figur 7.1. I Bilaga 5 beskrivs de nämnda metoderna mera ingående. En indelning har gjorts i metoder för koncentrationsmätning och flödesmätning. Därtill har indelning utförts för att skilja metoder som går att använda för ytor, längre avstånd med dem som används för att mäta källan. Slutligen utgör de metoder som används för att mäta metanemissionen från hela deponier en egen kategori.

Mätning av metankoncentration	Mätning av metanflöde
Hela deponier 	Koncentrationsmätning i kombination spårgas, LIDAR, FTIR, TDLAS
Ytor, delar av deponier HRPM Remote passiv IR-gas Imaging Technologies Remote passiv IR-gas - Imagi Visualisation Remote Quantitative laser gas Detection TDLAS LIDAR	VRPM Kammarmetod FID + kammarmetod Laser + kammarmetod
Punktutsläpp, mätning nära källan Flamjonisering (FID) Katalytisk förbränning Solid State IR absorption TDLAS Bubbeltest Vegetationsförändringar (indikatormetod) Akustisk detektering	Inneslutning Rotameter (flödesmätning i rör etc)

Figur 7.1. Uppdelning av detekteringsmetoder och kvantifieringsmetoder för metan i blandning med luft.

Det finns ett relativt stort antal metoder att mäta metanhalten i en luftblandning nära källan. Till dessa metoder kan tilläggas den noggranna koncentrationsmätning som kan göras i gaskromatograf etc. Några av metoderna används i övervakningen av uttag av deponigas i ett uttagssystem, såsom IR-absorption och katalytisk förbränning.

Flamjonisering (FID) används idag för detektering av punktutsläpp på deponier. IR-mätning används också, för dessa metoder finns utrustningar att tillgå kommersiellt.

FID är ett instrument där gasblandningen som skall mätas sugas in i instrumentet genom ett munstycke som hålls ca 5 cm ovan ytan. Sökningen sker genom att ytan genomsöks i stråk som är 25-50 m från varandra. Någon heltäckande sökning erhålls inte, men genom att söka vidare då förhöjda halter uppmäts blir sökningen tillfredsställande. Där förhöjda halter registrerats - skall ett förfinat rutnät genomsökas i det område där de förhöjda halterna upptäckts (UK Environment Agency, 2007). Ett handburet instrument säljs kommersiellt. Tillsammans med instrumentet levereras en GPS för samtidig positionsbestämning.

Användande av IR-detektor används för detektering av metan över deponiytor. Det förekommer att en IR-detektor sätts på ett terränggående fordon som framförs över deponiytan. Mätningen kan kombineras med GPS-bestämning, och en skanning över stora ytor kan göras.

Det är relativt få metoder som finns färdiga och tillgängliga för direkt kvantifiering av metanläckage från ytor. Den metod som är mest använd hittills är kammarmetoden. Metoden används i detta projekt och beskrivs ingående i avsnitt 10.

I den manual som tagits fram av UK Environment Agency förordas FID samt kammarmetod som en metod att kontrollera metanemissioner från deponier. FID används då som detekteringsmetod samt för klassificering av deponiytor från emissionssynpunkt, och kammarmetoden används sedan för att beräkna metanemissionen uttryckt som utflöde från en deponi. I den manual som framtagits har bestämts att antalet kammarmätningar skall beräknas ur formeln

$$n = 6 + 0,15 * \sqrt{Z}$$

där

n = antalet kammarmetodmätningar inom en delyta

Z = yttorleken på delytan (m²)

Avståndet mellan platserna för kammarmetodmätning $\sqrt{(Z)/n}$

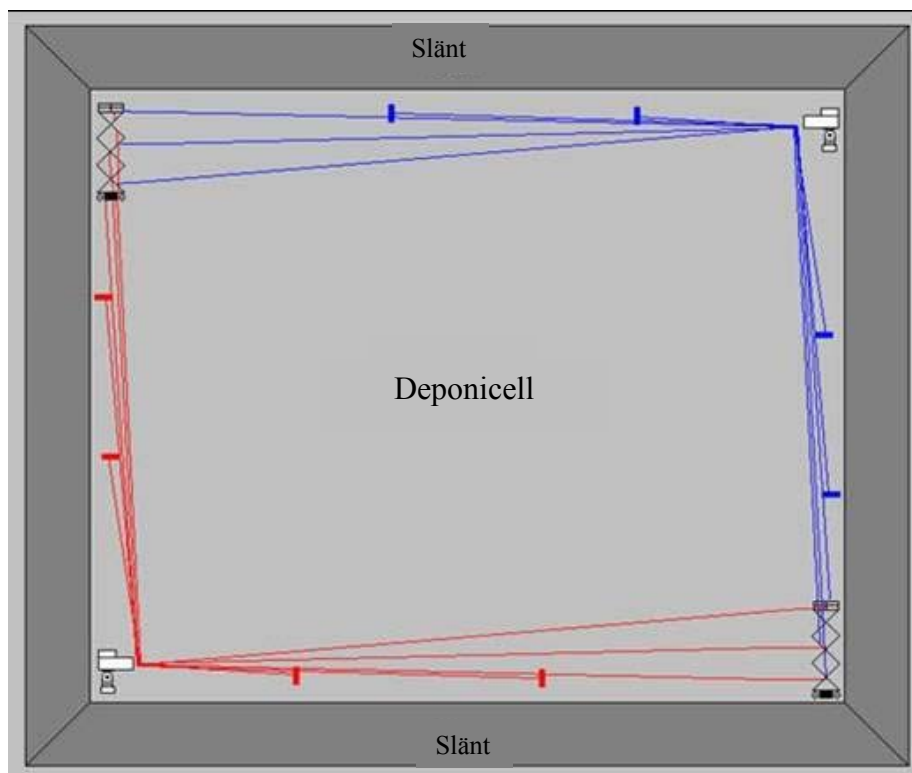
Denna beräkningsmetod är hämtad från USEPA (1986).

Den metod som ofta används för kvantifiering av metanläckaget för hela avfallsdeponier är spårgas tillsammans med metanmätning. En spårgas, t.ex. SF₆ släpps med känt flöde på deponin och plymen från detta utsläpp beräknas sammanfalla med utsläppet av metan från deponin. Både metan och spårgaskoncentrationerna mäts sedan i plymen som bildas i vindriktningen från deponin. För mätning och beräkning av emissionen används:

1. Detektering med ljus, differentiell absorption (LIDAR/DIAL), kvantitativ metod i kg/h eller mg/m³.
2. AIR detektion och AIRDAR, kvantitativ metod med resultat i E3 m³/yr.
3. Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), semikvantitativ, resultat i ppm x m.
4. FTIR, öppen strålgång Fourier Transform, semikvantitativ, resultat i ppm x m.

Firma Afvalzorg har lanserat en modifierad mätningsteknik för flödesmätning från hela deponier, som också använder spårämne och koncentrationsmätning "nedströms" i vinden (Jakobs, 2007). Man sätter här ut 14-15 vakuumflaskor för att samla in atmosfärsprover under 4 timmar samtidigt som spårgas släpps ut från en plats på deponin. I övrigt sker beräkning på samma sätt som ovan.

Vertical Radial Plum Mapping (VRPM) är en ny metod som lanseras av US EPA. Denna metod kan mäta flödet från delar av deponier. Ett laserinstrument används som är fastsatt på ett stativ. Laserinstrumentet kan genom förprogrammering riktas mot olika reflektorer som satts upp i hörnen av den yta som skall flödesbestämmas. Principen framgår av figur 7.2.



Figur 7.2. Mätning med laser mot reflektorer för bestämning av utflöde från en deponicell enligt VRPM-metoden.

Laserinstrumentet riktas med särskild automatik i ca 10 sek mot varje reflektor och koncentrationsdata lagras. Strålgången flyttas sedan till bästa reflektor och ny mätning görs. Ett flertal omgångar av mätningar görs.

Alla koncentrationsdata bearbetas och konverteras till flödesdata genom ett särskilt dataprogram. Tyvärr är detta dataprogram inte tillgängligt kommersiellt, utan databehandlingen görs genom University of Virginia, USA.

Enligt Boreal, det företag som lanserar utrustningen kommer metoden att kunna utvecklas till en tillgänglig fältoperativ metod i framtiden. I dagsläget är metoden för krånglig och utvecklingsarbete återstår.

Kammarmetoden är en metod som länge använts för att beräkna flöde från deponiytor under lång tid. Dess användningssätt framgår nedan då den använts inom detta projekt.

8 BEHOVET AV NY KOSTNADSEFFEKTIV TEKNIK OCH METODER

Det finns få kostnadseffektiva metoder för att detektera gasläckage och kartlägga gasemissioner från avfallsdeponier, dels för att få en översiktlig bild av gasemissionernas storlek för den aktuella deponin, och dels för att genom s.k. pinpointing lägesbestämma läckagekällor och kvantifiera storleken på gasläckaget. Det finns också behov av att ta fram underlag för akuta och mer långsiktiga åtgärder inom ramen för kontinuerlig övervakning, tillståndsanalys och åtgärdsprogram för en deponi ("condition monitoring").

Resultat från aktuell forskningslitteratur visar att etablerade fältmätmetoder, typ statisk eller dynamisk kammare, TDL-laser, kombinationen av kammarmetoden och mätning med laser i horisontal- och vertikalplan, etc. ofta är begränsade till att registrera gasemissioner från plana ytor (Chanton et al., 2007). Statisk och dynamisk kammarmetod kan användas för att mäta på plana ytor, slänter, släntröner och slänthöjd, men det är tekniskt svårt att utföra kammarmätning på branta och vegetationsklädda slänter. Dessutom visar olika studier att kammarmetoden är arbetsintensiv och det behövs ett betydande antal kammare för heltäckande mätning av metanemissioner eller metanoxidation för deponier. För att beskriva den rumsliga variationen och uppskatta medelflödet av metanemissioner för en deponi på 1,6 ha behöver man enligt beräkningar utföra mätningar med 5275 kammare (Börjesson, Svensson, 1997). För att erhålla mer pålitliga data bör man applicera ett rutnätssystem (Nozhevnikova et al., 1993) eller någon typ av fjärranalysystem (Jonas och Elgy, 1994).

Jacobs et al., (2007) redovisar en studie där man testat en lågkostnadsmetod för mätning av metanemissioner från avfallsdeponier. Författarna redovisar inledningsvis EUs regler för hantering av metanemissioner från deponier, E-PRTR reglerna som trädde i kraft 2007. Enligt dessa regler skall metanemissioner från deponier antingen (a) mätas på plats, (b) beräknas med hjälp av emissionsmodeller eller, (c) uppskattas av fältexperter.

- Mätning av årlig metanemission för en deponi bedöms för kostnadskrävande.
- Existerande emissionsmodeller bedöms (a) för osäkra, (b) inbördes icke jämförbara, (c) dålig samstämmighet med verkligheten.

Enligt Jacobs et al. (2007) så föreligger ett behov av att utveckla enkla och billiga metoder för att mäta och kvantifiera årliga metanemissioner från deponier. Sådana metoder skulle öka kunskapen om metanemissioner från deponier, förbättra modellparametrarna över tiden och därigenom öka jämförbarheten, överensstämmelse, träffsäkerhet och säkerheten i emissionsdata inom E-PRTRs databas.

Resultat redovisat i forskningslitteraturen under senaste årtionden bekräftar att det föreligger behov av kostnadseffektiva metoder för att detektera och kartlägga emissioner av metangas från avfallsupplag, från Börjesson, Svensson (1997) till Jacobs et al. (2007). Liknande iakttagelser och slutsatser redovisas dels genom resultat från fältlaborativa studier inom naturgasområdet utförda inom ramen för t.ex. VOGUE-projektet, ett EU-projekt om "remote methane gas detection", Ljungberg et al. (2004), dels genom fältlaborativa studier utförda vid Malmö Brandkärrs gasövningsplats (naturgas) och vid Filborna avfallsupplag (biogas), Ljungberg (2000), och dels genom iakttagelser och slutsatser redovisade i en världsomfattande inventering om "state-of-the-art of technologies for remote detection of natural gas", Ljungberg et al. (2000).

Mot bakgrund av de erfarenheter som redovisats i ovan refererad forskningslitteratur och de synpunkter och önskemål som framkommit inom arbetsgruppen av forskare och slutanvändare i föreliggande projekt konstateras att det finns ett stort behov av kostnadseffektiv och fältmässigt lätthanterlig teknologi för att på avstånd, utan att vidröra objektet (remotly) detektera, mäta och rumsligt lokalisera metanemissioner och läckagekällor vid avfallsupplag.

Kostnadseffektiv teknologi definieras här som mätteknik och metoder som är billiga och lätthanterliga relativt värdet och nyttan av den information om förekomst av metanemissioner som slutanvändaren erhåller jämfört med etablerad mer arbetsintensiv och kostnadskrävande teknik och fältmätmetoder.

Det föreligger också behov av att utveckla operativa metoder där man samordnar och integrerar olika typer av fjärranalysteknik och kompletterande fältmätteknik till en för slutanvändarna operativt hanterbar metodarsenal. Dessutom behövs instruktioner och guidelines för val av lämplig teknik och metoder för detektering, kartläggning, lagring, presentation och utvärdering av information om gasemissioner från avfallsupplag. Det är också önskvärt att slutanvändarna med hjälp av dylika instruktioner kan få vägledning för att bedöma användbarhet och begränsningar i mätprestanda och förväntad nytta vid val av olika typer av mätteknik och metoder för kartläggning och statusbestämning av gasemissioner från hela eller delar av ett avfallsupplag.

En avfallsdeponi består av en stor volym avfall som deponerats kontinuerligt under en längre eller kortare tidsperiod. Det deponerade avfallet har i Sverige tills helt nyligen till stor del bestått av organiskt nedbrytbart avfall. Den biokemiska processen i ett avfallsupplag och produktionen av metangas kan variera avsevärt beroende på materialegenskaper hos det organiska material som deponerats, hanteringen och lagringsförhållandena hos deponin, och beroende på åldern hos de olika delområdena (cellerna) inom ett avfallsupplag. Eftersom avfallsupplag normalt består av en stor volym och har stora variationer i den organiska processen är det viktigt att utveckla fältmätande operativa metoder som ger både en översikt av metangasemissionen för hela deponin och samtidigt ger detaljerad information om lokaliseringen och koncentrationen av metangas från olika gasläckage. Erfarenheter från VOGUE-projektet (Ljungberg, 2004) indikerar att modern fjärranalysteknik som handburen, mobil och flygburen laser och IR-teknik med fördel kan användas för att spåra, detektera och kartlägga gasemissioner, och ge såväl översiktlig som detaljerad information om gasemissioner från små och stora ytor.

9 FJÄRRANALYSMETODER FÖR STATUSBESTÄMNING AV GASEMISSIONER FRÅN AVFALLSDEPONIER

9.1 Fjärranalys-teknik och metoder

Fjärranalys (Remote Sensing, RS) är samlingsnamnet på en grupp stationära, handburna, mobila, flygburna och satellitburna tekniska system med vars hjälp man kan registrera, och mäta egenskaper hos ett objekt på avstånd, utan att vidröra och påverka objektet. Fjärranalystekniken har sitt ursprung i militär forskning och militära tillämpningar med syfte att i första hand användas för att spåra och identifiera objekt och gasformiga företeelser på land och i luften, och för bevaknings- och övervakningsuppdrag (surveillance). Modern fjärranalysteknik utvecklas numera även vid civila forskningsinstitut, tekniska universitet och vid företag inom det privata näringslivet. Fjärranalysteknologi känd för allmänheten är främst analoga eller digitala kameror, satellitsystem för väderobservationer, och medicinska system för avbildning av tillstånd hos människokroppen.

Fjärranalysteknologin är ett ungt teknikområde relaterad till många olika discipliner som tillämpad fysik, elektronik, optik (optronik), datorvetenskap, geomatik, discipliner för tillverkning av precisionsinstrument, och tillämpad metodologi etc. Från början av 1980-talet har det varit en snabb utveckling inom fjärranalystekniken för civila tillämpningar, främst inom infraröd-, laser-, och radarteknologin. Som exempel kan nämnas teknologi för att detektera gasemissioner från ledningsbundna system lokaliserade ovan och under mark. Andra exempel är miljötillämpningar, typ kartläggning av gas- och partikelsammansättning i luften, föroreningar i hav, insjöar och vattendrag, och medicinska tillämpningar som medicinsk laser. Markpenetrerande radar för kartläggning av objekt lokaliserade i mark och för detektering av miljöfarligt avfall deponerat i mark, infraröd teknik och radar för statusbestämning av byggnader och teknisk infrastruktur ingår i modern fjärranalys. Fjärranalyssystem som luftburen laser och radar för storskalig mätning för miljötillämpningar är andra aktuella tillämpningar.

9.2 State-of-the-art – produkt och metodutveckling

I december 1997 etablerades en internationell arbetsgrupp med uppdrag att genomföra en världsomfattande inventering av "state-of-the-art of remote gas detection technologies". Arbetsgruppen bestod av representanter från universitet och internationella forskningsinstitutioner, och från flera av världens största gasproducenter och gasdistributörer, inkluderande vetenskapsmän från bl.a. Sandia National Livermore, USA, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) Sverige, Gas Research Institute (GRI) USA, VNIIGAZ Gazprom Russia, Japan Gas Association, Gasunie France, British Gas, Dansk Gasindustri Danmark, Svenskt Gastekniskt Centrum (SGC). En rapport levererades av arbetsgruppen 2000 och en rad olika forskningsgrupper etablerades med syfte att utföra FoU-projekt kring "remote gas detection technologies". Som ett resultat från dessa forskningsgruppers arbeten presenterade Japan Gas Association och Tokyo Gas ett handburet lasersystem för fjärregistrering av metangas, 2002, och Sandia National Livermore presenterade en prototyp laser system för gas detektering 2004. Ett EU-finansierat FoU-projekt, VOUGE-projektet (Visualisation of Gas for Utilities and the Environment) producerade 5 lasersystem för fjärrdetektering av metangas testade av

europiska slutanvändare för gasdistributionsnät 2004. En slutrapport från VOGUE-projektet levererades till EU-kommissionen augusti 2004.

Författarna (Ljungberg och Meijer) medverkade i den internationella arbetsgruppen för den världsomfattande inventeringen av "state-of-the-art of remote gas detection technologies", med S-Å Ljungberg som koordinator.

Sven-Åke Ljungberg (KTH) och Owe Jönsson (SGC) var ansvariga för FoU-delen kring "passive gas imaging" och "methane gas behaviour" inom EUs VOGUE-projekt. Huvudsyftet med VOGUE-projektet var att utveckla lasersystem för att fjärrdetektera och visualisera metanläckage från gasledningar, lokalisera under och ovan mark, och studera och öka kunskapen om metangasens beteende under olika tryck, flöden, väder- och utstrålnings-förhållanden, liknande de som möter slutanvändaren vid praktisk användning av fjärranalys för gasdetektering.

Under produktutvecklingen testades två olika prototypsystem varav ett system utvecklades av Siemens i München och det andra av forskare vid universitet i Glasgow. Båda prototyperna är testade under kontrollerbara förhållanden vid ett fältlaboratorium vid Malmö Brandkårs gasövningsplats, vid en fälttestanläggning hos ADVANTICA (f.d. British Gas) och vid olika distributionsnät i Europa, utvalda av slutanvändare inom projektet.

De lasersystem som utvecklats inom VOGUE-projektet mäter metangaskoncentrationen utmed en strålgång och redovisas i ppm x m. Högupplösande passiva IR-system användes som kompletterande teknik för att detektera och visualisera simulerade läckage av metangas från gasledningar lokalisera under och ovan mark i syfte att studera metangasens beteende under olika gasflöden, tryck, storlek på gasläckagekällan, olika fyllnadsmaterial, väder- och utstrålningsförhållanden.

En av slutsatserna från VOGUE-projektet var att lasersystemen som utvecklats för detektering av metangasläckage från gasdistributionssystem även bör kunna användas för miljötillämpningar och för detektering av metangasemissioner från avfallsupplag.

9.3 *Förstudie för test av laser- och IR-system för detektering av metanemissioner från avfallsupplag*

I syfte att undersöka om VOGUE-laser systemet och kompletterande IR-system är användbara för att detektera, visualisera och kartlägga gasemissioner från avfallsupplag utfördes en pilotstudie med upprepade fältlaborativa test vid Filborna avfallsupplag, Helsingborg under ca ett år, perioden februari 2005 – mars 2006. Under den aktuella testperioden användes den prototyp-laser som utvecklats av Siemens München samt olika typer av högupplösande värmekameror tillverkade av FLIR Systems AB, Sverige. Studien var den första i sitt slag såväl nationellt som internationellt. Resultaten från testen indikerade att handburen laser och IR-teknik kan bli ett effektivt redskap för att detektera och visualisera gasemissioner från avfallsupplag.

Förstudien vid Filborna föregicks av en test med helikopterburen flygtermografering av kända läckageobjekt vid fältlaboratoriet vid Malmö Brandkårs gasövningsplats och vid Filborna avfallsanläggning. Nedan görs en kortfattad redovisning av de fältlaborativa försöken med flygtermografering.

De flygburna fältförsöken har sitt intresse för iakttagelser och slutsatser från fältmätningar redovisade i det avrapporterade projektet, och för eventuellt framtida FoU-projekt eftersom det visar informationspotentialen i flygburen fjärranalysteknik för att detektera gasläckage från avfallsupplag med luftburen infraröd teknik.

Resultaten från försöken med flygtermografi för detektering och visualisering av metangas rörde stor internationell uppmärksamhet och ledde till bildandet av en internationell arbetsgrupp av forskare och slutanvändare som genomförde den inventering av "state-of-the-art of technologies for remote detection of natural gas" som redovisats i avsnitt 9.2, och som sedan kom att leda till utformningen och genomförandet av EU-projektet VOGUE.

Vid försökstillfället användes en FLIR THV 1000 långvågs värmekamera monterad i en kula, GIMBLE, ARGUS 350 Stable Eye type C, stabiliserande plattform med en Hughes 500 helikopter som instrumentbärare, se figur 9.1. Värmekameran opererades inifrån cockpit med hjälp av en handhållen manöverpanel och joystick enhet. Värmebildsdata lagrades på en analog bandspelare och ett urval värmebilder lagrades på hårddisk för senare bearbetning och analys i bildlaboratorium. Den aktuella värmekameran har en detektor som är känslig inom det övre våglängdsområdet för metangas, 7,9 μm .

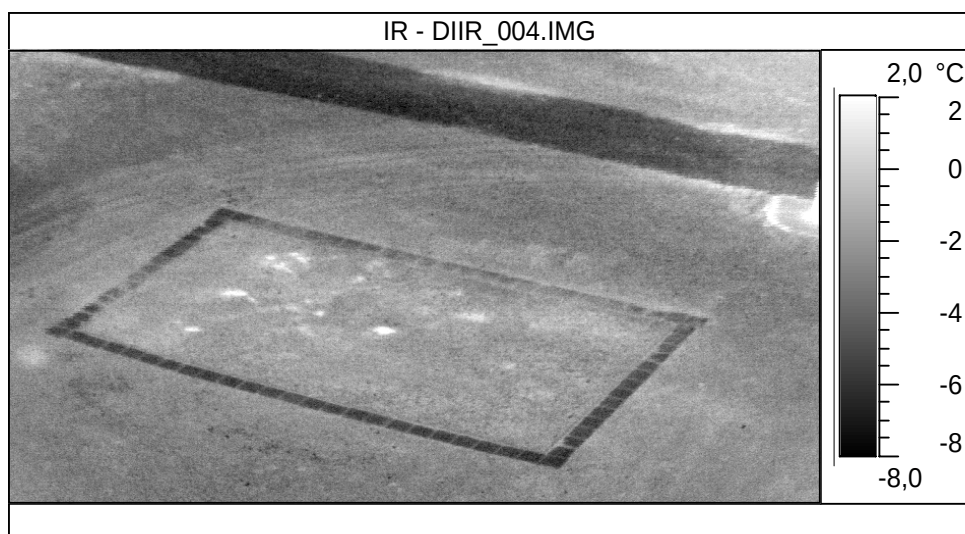
Undersökningsobjekten bestod av en testanläggning med kulvertgravar med möjlighet till simulering av gasläckage vid fältlaboratoriet vid Malmö Brandkårs gasövningsplats och en testyta med sex vertikala gasuttagsrör vid Filborna avfallsanläggning. Gasrören vid Filborna var vid det aktuella mättillfället inte anslutna till gasuttagssystemet utan metangasen hade fritt utflöde till atmosfären.



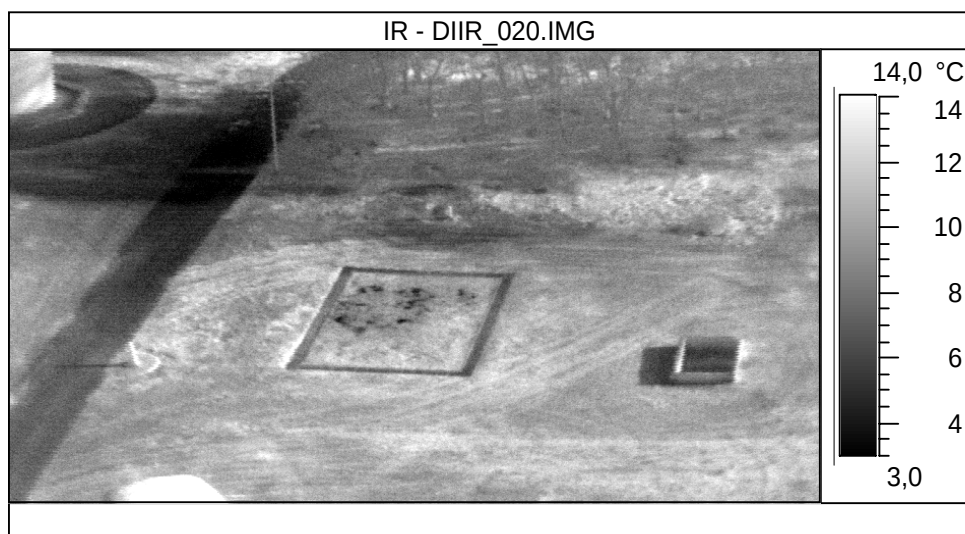
Figur 9.1. Högupplösande AGEMA Thermovision 1000 långvågs värmekamera, 8-14 μm , monterad i en GIMBLE, ARGUS 350 Stable Eye type C, stabiliserande plattform, med en Hughes 500 helikopter som instrumentbärare.

Figurerna 9.2 och 9.3 visar variationer i strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster i flygvärmebilder från delar av fältlaboratoriet vid Malmö Brandkårs gasövningsplats som indikerar förekomst av läckage av metangas från markytan, dels i form av ljusa punkter som indikerar läckage där gasen är varmare än omgivande yta (figur 9.2), och dels som mörka

punkter där gasen är kallare än omgivande yta (figur 9.3). Gasläckagen är simulerade genom markförlagda perforerade gasrör med ett gastryck på 0,5 bar, flyghöjd 60 m.



Figur 9.2. Flygvärmebild med avvikande strålningstemperatur och strålnings-temperaturmönster, ljusa punkter där gasen är varmare än omgivningen och indikerar läckage av metangas från markförlagd ledning. Flyghöjd 30 m, gastryck 0,5 bar.



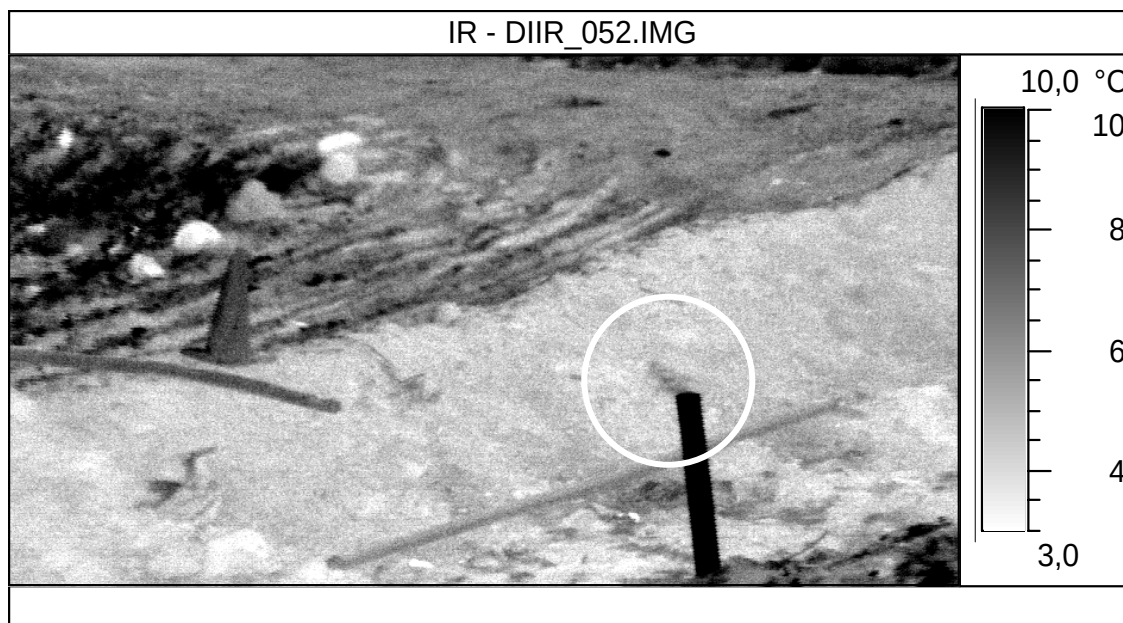
Figur 9.3. Flygvärmebild med avvikande strålningstemperatur och strålnings-temperaturmönster, mörka punkter där gasen är kallare än omgivningen och indikerar läckage av metangas från markförlagd ledning, mörka. Flyghöjd 60 m (180 ft.), gastryck 0,5 bar. Gasen kan inte visualiseras p.g.a. ett kraftig nedvep av luftströmmar från helikopterns rotor.

Figur 9.4 visaren en fotografisk bild av en testyta för markbaserad och flygburna test av gasläckage från vertikala gasrör som vid mättillfället inte var inkopplade på gasuttags-systemet, Filborna avfallsupplag Helsingborg. Figur 9.5 visar en flygvärmebild med exempel på läckage av biogas från ett av de sex vertikala gasrören vid testytan, flyghöjd 60 m, ett gasflöde av storleksordningen 15 m³/timme (Meijer, 2008). Observera, värmebilden återger bara en ögonblicksbild av gasläckaget i form av en mörk plym i toppen/öppningen av gasröret. En längre sekvens av läckaget av biogas från de sex vertikala gasrören finns registrerad i realtid på videoband. På videobandet kan man se att metangasemissionen från

rören pulserar i tidsintervaller från höga flöden till låga, avtagande flöden ner till intervaller med inget synbart/mätbart flöde, sannolikt relaterat till dynamiska gasprocesser nere i deponin. Liknande iakttagelser har konstaterats vid upprepade fältmätningar med Siemens lasersystem och FLIRS IR-GasFinder system inom ramen för det avrapporterade projektet.



Figur 9.4. Testyta för markbaserad och flygburna test av simulerade gasläckage från avfallsupplag, Filborna, Helsingborg. Vertikalt gasrör som visas i figur 9.5 är inringat på bilden.



Figur 9.5. Flygvärmebild som visar läckage av biogas från ett vertikalt gasrör vid Filborna avfallsupplag. Flyghöjd ca 60 m (180 ft.), gasflöde ca 15 m³/timme.

Det finns två olika typer av metoder för att detektera gasläckage med hjälp av mark- och flygbaserad termografi:

(1) **Indikatormetoden**, där man gör jämförande analys av skillnader i strålningstemperatur (ΔT) och strålningstemperaturmönster för ett mätobjekt och ett referensobjekt. ΔT används som ett mått och indikator på ett avvikande tillstånd och skall tolkas som en sekundär effekt av förekomst av ett gasläckage.

(2) **Visualiseringsmetoden**, där man detekterar och visualiserar en specifik gas med hjälp av en värmekamera med en detektor som är känslig inom den specifika gasens spektralområde. Värmebildsdata lagras här kontinuerligt i realtid på en analog eller digital bandspelare för tolkning och analys i ett bildlaboratorium.

Värmebildsdata från både indikator- och visualiseringsmetoden kan lägesbestämmas med hjälp av en högupplösande GPS, och lagras företrädesvis digitalt vilket medger att man vid datorbaserad analys och tolkning kan framställa temperaturprofiler och mäta ΔT i värmebilden.

Modern högupplösande IR-teknik med en detektor som arbetar inom den specifika gasens spektralområde och med GPS kan användas för att detektera, visualisera, studera och lägesbestämma gasemissioner från avfallsupplag och från ledningsbundna gassystem lokaliserade under och ovan mark. Observera att flygtermografi med sin nuvarande utformning inte är en mätande metod för att bestämma gasflöden eller gaskoncentration. För att mäta gasflöden, etc. fordras kompletterande konventionella mätmetoder, som sniffers etc.

I likhet med annan etablerad teknik, inklusive Siemens lasersystem, så kvarstår problemet med att mäta vid rätt tidpunkter så att man får en rättvisande bild av gasemissionerna hos ett avfallsupplag. Med beaktande av att metangasemissioner från ett avfallsupplag sannolikt sker oregelbundet i tid och vad gäller emissionsstorlek går det inte att mäta vid en tidpunkt. En lägre tids mätning erfordras. Inom ramen för modern fjärranalys har utvecklats en kombination av datorstyrda övervakningssystem för säkerhetsbevakning och för kontinuerlig miljöövervakning, från stationära till flyg- och satellitburna laser och IR-system, koncept som bör vara intressanta även för deponitillämpningar.

9.4 Lasersystem för detektering och kartläggning av metangasemissioner från avfallsupplag

I projektet har använts ett handburet Siemens AG, CT PS 8 lasersystem (figur 9.6) utvecklat för fältmässig fjärrdetektering av gasemission från naturgas inom ramen för VOGUE-projektet (VOGUE, 2004).

Tekniska data för lasersystemet:

Operativt våglängdsområde	1651 nm
Tid respons	100 ms
Detektionsområde - gaskoncentration	$0 \geq 1000 \text{ ppm} \times \text{m}$
Operativ batteri kapacitet	3-5 timmar, beroende på omgivningstemperatur
Operativt temperaturområde	-10 +40 °C
Operativt avstånd/räckvidd (range)	$\geq 10 \leq 30 \text{ m}$, beroende på reflekterad backscatter-yta, med lämplig reflektor kan räckvidden utökas till $\geq 100 \text{ m}$, (Strzoda, 2008)
Nedre detektionsgränsen	$10\text{-}20 \text{ ppm} \times \text{m}$, beroende på reflekterad laserstyrka (för ytterligare teknisk specifikation, se bilaga 2).

Siemens laser system arbetar med en infraröd laser, 1651 nm, och är ett s.k. backscatter system där laserstrålen sänds ut och registrerar koncentrationen av metangas utmed en strålgång där 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. Detta skall tolkas så att om mätsträckan som laserstrålen färdas genom är lång så integreras metanemissioner utmed hela sträckan och kan därför ge ett missvisande högt ppm-värde. Vid horisontell skanning av stora deponiytor får man ofta varierande och höga ppm-värden beroende på hur man varierar den horisontella vinkeln, dvs. vid rakt horisontellt läge integreras all metangas utmed lasersystemets totala räckvidd, ca 30 m.

Om mätsträckans längd är känd så kan man dividera det erhållna ppm-värdet med 2 x avståndet i meter mellan lasersystemet och backscatterytan och får då ett medelvärde på den uppmätta gaskoncentrationen mellan instrumentet och backscatterytan. Skall förhöjningen av metankoncentrationen utöver medelkoncentrationen i atmosfären (1,7 ppm, IPCC, 2007) beräknas, subtraheras det beräknade värdet i ppm x m med 2 x avståndet i meter x 1,7.

Vid skanning av ett gasmoln vet man inte var gasläckaget börjar eller slutar, inte heller var läckagekällan finns i gasmolnet. Vid pinpointing söker man aktivt läckagekällan först genom horisontell skanning för att indikera förekomst av gasemissioner och därefter genom vertikal avsökning och detektering tills man hittar läckagekällan/källorna. Det är således viktigt att utarbeta och välja rätt fältnätmetoder för när man skall använda lasern som ett skannande instrument och som en metod för att söka och detektera källan till ett metangasläckage. Siemens lasersystem kan antingen hållas handburet för skanning och pinpointing eller placeras på ett fotostativ för detaljerad långtidsmätning av gaskoncentrationen för ett känt läckageobjekt.



Figur 9.6. VOGUE Siemens AG, CT PS 8 Remote Natural Gas Leak Detector Field Unit (för teknisk specifikation, se bilaga 2).

Det ska noteras att Siemens lasersystem AG, CT PS 8 är konstruerad med en laser för detektering av naturgas, dvs. metangas med metanhalter på 96-98 %, att jämföras med metanhalter på 40-60 % för deponigas.

9.5 *Högupplösande infraröd teknik för detektering och visualisering av metanemissioner från avfallsupplag*

I det aktuella projektet har utförts test med en nyligen konstruerad FLIR IR-GasFinder för att detektera och visualisera metangasläckage från deponiytor och gastekniska system vid avfallsupplag. GasFinder-systemet kan användas för att detektera och visualisera en rad olika gaser inklusive metangas från avfallsupplag, naturgas från ledningsbundna system lokaliserade under och ovan mark, gas- och lakvattenbrunnar, gasturbiner, gastankstationer etc.

Fördelen med GasFindern är att den kan användas för att detektera och lokalisera läckagekällor och för att studera och följa ett gasmolns uppkomst, utbredning och avklingning.

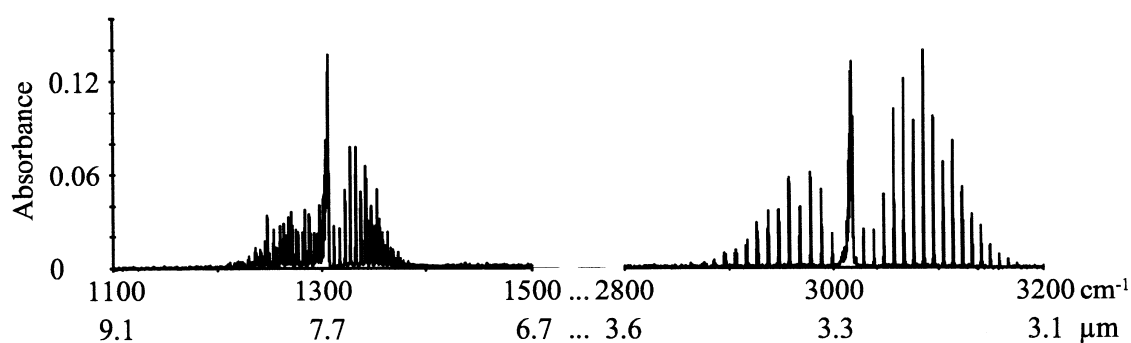
Nackdelen med GasFindern är att den i likhet med all IR-teknik är temperaturberoende. Med sin nuvarande termiska och geometriska upplösning kräver GasFindern en relativt hög gaskoncentration för att metangasen skall kunna detekteras och visualiseras. Gränsen för detekterbar metangas varierar beroende på hur stor temperaturskillnaden är mellan gasen och omgivningstemperaturen respektive gasen och emissionsfaktorn för det ytmaterial som metangasen penetrerar genom ut till atmosfären. Resultat från de fältförsök som utförts inom projektet indikerar att man behöver ha en metangaskoncentration på $\geq 1000 \text{ ppm} \times \text{m}$ och ett ΔT mellan metangasen och omgivningen som är $\geq 2 \text{ }^\circ\text{C}$, beroende på vindhastighet, utstrålningsförhållanden etc.

Informationspotentialen hos GasFinder-system bedöms som stor och användbarheten bedöms att öka för nästa generations GasFinder med högre termisk och geometrisk upplösning. Som kontrollsystem för säkerhetskontroll av gasdistributionssystem och för stora, för ögat icke synbar metanemission, är den redan ett användbart hjälpmedel.

Figur 9.7 och figur 9.8 visar FLIRs IR-GasFinder-system. Värmebildsdata kan lagras digitalt i realtid på en DVD-enhet kopplad till systemet. Systemet kan användas som ett handburet system, eller som ett stationärt skannande eller fast riktat system monterat på ett vanligt fotostativ, alternativt användas mobilt med GasFindern monterad på en kula/mast på en bil, manövrerbar med en joystick-enhet inifrån fordonet.



Figur 9.7. FLIRs ThermoCAM™ GasFindIR SW (för teknisk specifikation, se bilaga 3).



Figur 9.8. Spektral områden för långvågig och kortvågig IR-system för detektering och visualisering av metanemissioner, (7,7 μm) respektive (3,3 μm).

9.6 *Kravspecifikation på fjärranalys för detektering av biogas*

Kravspecifikation för detektering av biogas enligt inventeringen om ”state-of-the-art of technologies for remote detection of natural gas”, användes som riktlinje inom VOGUE-projektet (avsnitt 9.2), och uppdaterades med information från slutanvändare inom det avrapporterade projektet med avseende på deponitillämpningar.

Tabell 9.1. Naturgasstillämpningar, användares prioritering vid olika kategorier och tillämpning, enligt slutanvändares utvärdering och prioritering av fjärrdetektering av naturgas för tillämpningar 1-5. Efter en bedömning utförd av delegater från en internationell referens- och arbetsgrupp, Malmö, Sverige 14-26 september 1998.

Prioritering	Specifikation kategorier och kriterier	Räckvidd			1	Detektionsgräns (A) (önskemål/gräns)	3		2		4	
	Tillämpning	H	M	A			B	NB	B	NB	B	NB
4	1. Produktion	10 m	100 m	100-500 m	2,2 poäng 0,1 - 2 %	1	-	5	-	5	-	0
2	2. HP Transmission	-	-	50-500 m	3,4 poäng 10 - 500 ppm	0,5 - 2	5	-	4	-	-2	-
1	3. LP Distribution	30 m	5-30 m	-	3,6 poäng 1 - 10 ppm	0,1 - 1	5	-	3	-	4	-
3	4. LNG Lagring	10 m	100 m	100-500 m	2,6 poäng 0,1 - 2 %	1	-	3	-	3	-	0
3	5 Inomhusluft	5 m	--	-	2,6 poäng 0,06 - 5 l/h	0,1	-	-1	-	1	-	-5

- (A) detektering – att kunna detektera ett gasläckage
 (B) kartering – skanning av ytor för att detektera diffus gasavgång och punktkällor
 (B) pinpointing – lokalisering av punktläckage
 (C) mätning – mätning av gasläckage, koncentration

B = nedgrävda ledningar
 NB = ej nedgrävda ledningar

H = Handburet instrument
 M = Mobilt, monterat på bil eller 2-hjulig kärre
 A = Flygburet instrument

Tabell 9.2. Biogas och miljöföreläggningar - krav och tekniska kriterier från slutanvändare, enligt slutanvändares utvärdering och prioritering av fjärrdetektering av naturgas för tillämpningar 1-5. Efter en bedömning avseende deponier utförd av Jan-Erik Meijer 1999, respektive bedömning för miljöföreläggningar av Greta Akopova, VNIIGAS, GASPROM, båda delegater från en internationell referens- och arbetsgrupp, Malmö, Sverige 14-26 september 1998.

Prioritering	↓	↑	Specifikation kategorier och kriterier	Räckvidd			1	3	2		4	
				H	M	A						
			Tillämpning:									
1			1 Avfallsdeponi	10 m	100-500 m	100-1000 m	10-500 ppm					
3			3. Distributionsledningar, låga tryck	30 m	5-30 m	-	10-500 ppm					
2			5 Användning inomhus	5 m	--	-	2,6 points 0,06 - 5 l/h					
			Tillämpning:									
1-2			7. Miljö	5-30 m	5-100 m	100-1500 m	10 [*] -400 ppm					

* Maximalt tillåten koncentration CH₄ i bostadsområden (Ryssland).

* Maximalt tillåten koncentration CH₄ i industriområden (Ryssland).

B = nedgrävda ledningar

NB = ej nedgrävda ledningar

H = Handburet instrument

M = Mobilt, monterat på bil eller 2-hjulig källa

A = Flygburet instrument

10 METODVAL

10.1 *Allmänt*

För fältmätning med syfte att detektera, kartlägga och visualisera gasemissioner från avfallsupplag har utarbetats fältlaborativa metoder och fältmätmetoder inkluderande den i avsnitt 9 redovisade fjärranalysteknologin.

SIEMENS VOGUE lasersystem, AG, CT PS 8, som är ett mätande instrument, har valts för att det var det lasersystem som bedömts bäst lämpad för att utveckla metoder för att detektera metanläckage, spåra metanläckagekällor, kartlägga gasemissioner och mäta metankoncentration i ytskiktet av avfallsupplag.

FLIRs ThermoCAM™ GasFindIR LW som är ett avbildande instrument har valts för att det var det enda IR-system på marknaden för att detektera och visualisera metanemissioner för att studera uppkomsten och spridningsmönstret av gasemissioner och gasmoln vid avfallsupplag.

Kompletterande fältreferensmätningar har utförts för urval väder- och utstrålningsparametrar som bedömts angelägna att registrera före, under och efter mätning med laser- och IR-detektering av metanemissioner. Merparten mätningar av fältreferensdata har utförts nära eller i direkt anslutning till objekt och ytor där laser- och IR-mätningarna registrerat förekomst av metanemissioner.

Figur 10.1 visar några av de mätsystem som använts för fältreferensmätning. I början av projektet dokumenterades fältreferensdata i skriftliga fältprotokoll illustrerade i figur 10.3. I ett senare skede av projektet kompletterades med ytterligare fältparametrar, typ deponitryck, atmosfärstryck, gastemperatur, yt- och omgivningstemperatur som mättes under längre mätperioder och lagrades i realtid i en fältanpassad datalogger (figur 10.2).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figur 10.1. Referensmätsystem: (a) kontakttemperaturmätare, (b) lufttemperaturmätare, avskärmd från himmelsstrålning, (c) infraröd strålningstemperaturmätare med laserpekare för mätning av himmelsstrålningstemperatur och för temperaturmätning av utgående gas och av angränsande objekt/ytor, (d) roterande vindhastighetsmätare, (e) Variotec-6 gas sniffer, (f) exempel på insamling av referensdata vid fältlaborativa försök med samma mätteknik och mätrutiner som vid fältmätningar.



Figur 10.2. Vänstra bilden visar logger med mätsystem för mätning av referensdata för mätning av väder- och utstrålningsparametrar, deponitryck, gastemperatur vid läckagekällan, vindhastighet, atmosfärstryck etc. Högra bilden visar samma mätsystem uppställd för detaljerad mätning av metankoncentration direkt vid läckagkällan.

Plats: Forsbacka								Signatur: SÅL	
Områdesbeskrivning: F1 S:a slänten									
Forsbacka_F1_1-8_070712_02.xls									
Mätserie		1	2	3	4	5	6	7	8
Objekt		F1-01	F1-02	F1-03	F1-04	F1-05	F1-06	F1-07	F1-08
GPS, X-koord									
GPS, Y-koord									
GPS, Z-koord									
Datum:		2007-07-12	2007-07-12	2007-07-12	2007-07-12	2007-07-12	2007-07-12	2007-07-12	2007-07-12
Tid:		13,42	13,35	13,1	13,22	13,18	13	12,55	12,45
ppm x m	**	500-7000	<=500	<=1400	<=250	1500-2000	10-30	1500-2000	<=1100
FLIR, Fil nr									
T _{yt}		20,8	23,5	23,2	25,4	26,0	26,0	33,5	21,4
T _g		23,5	21,3	22,2	24,6	26,0	26,2	26,5	21,4
T _{y-g}									
T _L		21,5	19,5	22,3	19,3	20,0	23,7	21,3	18,8
T _{panel}									
T _{p-g}									
T _H	*	-3	-2	-3 -40	-3 -5	-4 -47	-2 -49	-2 -40	-3 -48
T _{H-T}									
T _{ref}									
Vindstyrka		0,5	1,5-2,2	0,5	0,5	0,5	0-0,5	0,5-1,0	1-1,5
Vindriktning		NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Plane Surface	☐								
Edge	☐								
Slope	☐								
Släntfot	☐								
Gasbrunn	☐								
Lakvattenbrunn	☐								
Lakvattendamm	☐								
Lakvattenkista	☐								
Gasledning	☐								
Plastad yta	☐								
Täckt yta	☐								
Sluttäckt yta									
Täckt yta	☐								
SL	☐								

Kommentar: * Varierande molnighet ger större variationer i himmelstrålningstemperatur (Ts).
 ** Gas ur söndrig flaska, 500 ppm, se nedan (2 olika ppm-värden vid samma mättillfälle).
 ** 2 olika ppm-värden, 500 ppm vid ursprunglig markering/stakkäpp, ≥ 7000 ppm ca 90 cm SOO från stakkäpp, mellan två stenar.

Figur 10.3. Exempel på fältvariabler, fältdata och fältobjekt där data i början av projektet lagrats som handskrivna dokument direkt i fält, och där samma typ av data kompletterat med data om deponitryck etc. som senare lagrats i datalogger för jämförande analys med laser- och IR-data.

10.2 Mätmetoder

Syftet med de fältlaborativa testerna vid gasövningsplatsen i Malmö var att under kontrollerbara förhållanden simulera och detektera metangas från ledningsbundna gasdistributionssystem lokaliserade under mark för att försöka bestämma gränserna för detekterbarhet hos Siemens lasersystem relaterat till flöde och avstånd.

Syftet med de upprepade fältoperativa testerna vid Filborna var att ta fram underlag för att utarbeta fältoperativa metoder för detektering och kartläggning av gasemissioner från avfallsupplag under verklighetstroga förhållanden.

Som framgår av tidigare redovisade avsnitt så består avfallsupplag vanligtvis av en stor yta med en stor volym, har en varierande topografi och en varierande sammansättning av deponerat material. Det är mot bakgrund av deponiers storlek och komplexitet viktigt att testa och utveckla kostnadseffektiv teknik och kostnadseffektiva metoder för att på ett hanterbart sätt kunna spåra, detektera och kartlägga metanemissioner från avfallsupplag. Resultat från sådana fältmätningar skall kunna användas för att kartlägga metanemissioner som underlag för miljövärdering av deponier, ge information som underlag för kort- och långsiktig planering av emissionsbegränsande åtgärder, typ akuta och förebyggande underhåll av uttagssystem, lakvattensystem och som underlag för instruktion och utbildning av deponipersonal. Inom ramen för metodval och metodutveckling bör också beaktas förutsättningarna att utvärdera användbarhet och begränsningar hos vald teknologi och fältmätmetoder.

Mot bakgrund av iakttagelser och erfarenheter från tidigare förundersökningar och de ovan angivna fältlaborativa och fältoperativa försöken utarbetades förslag till fältoperativa metoder i diskussion och samråd med projektets referensgrupp, resulterande i följande metodval:

1. För sju deponier i Sverige koncentreras fältmätningar till ett urval typytor som valts ut tillsammans med personal från respektive deponi. Målsättningen var att typytorna är generaliserbara för svenska deponier, men att även objekt/tytor specifika för en speciell deponi skall ingå i fältmätmetoden. I fältmätstudien ingår även metodutveckling för statusbestämning av gasuttagssystem och lakvattensystem.
 - **Fältmätning** med laser görs som ett första moment genom översiktlig skanning av metanemissioner för aktuell deponiyta. Därefter utförs detaljerad fältmätning, s.k. pinpointing för att spåra, detektera, mäta gaskoncentration, och lägesbestämma läckagekällor. Lägesbestämning görs med hjälp av högupplösande GPS.
 - **Kompletterande fältmätning** görs med FLIRs ThermoCAM™ GasFindIR LW för ett urval objekt/tytor i syfte att detektera, visualisera och studera spridningsbilden hos metangas för olika typer av läckagekällor.
 - **Fältreferensmätningar** görs vid varje mättillfälle med den fältmätteknik och för de fältparametrar som finns redovisade i avsnitt 10.2.
 - **Mätning av gasflöden** utförs för ett urval delytor. Parallellt med mätning med kammarmetoden utförs fältmätning med laser, direkt före och direkt efter att kamrarna placerats på respektive avlägsnats från mätytan. Jämförande lasermätning görs dels för hela delytan och dels för kammartytor.

- **Simulering av metanläckage.** För studier av kontrollerat diffust utsläpp används en för ändamålet konstruerad låda med syfte att simulera av gasläckage och försöka kalibrera kammarmetoden och laserinstrumentet. Lådan har betecknats som en sandyta i tabell 13.3. Försöksanläggningen är lokaliserad vid Filborna avfallsupplag.
- **Geoelektricitetsmätningar.** I ett senare skede av projektet kompletteras fältmätningarna enligt ovan med geoelektricitetsmätningar i syfte att kartlägga metangasprocesser och vattenflöden inne i deponin. Parallellt med dessa mätningar görs jämförande fältmätning med laser- och kammarmetoden för den aktuella deponiytan.

Mot bakgrund av iakttagelser och erfarenheter från fältmätningarna i Sverige utvecklades därefter ett fältmätprogram för fältmätningar i Frankrike:

2. I Frankrike var syftet att utföra fältmätningar på för operatörerna två okända deponier, objekt och mätytor, betecknade Upplag F1 och F2 vilka beskrivs under kapitel 15. Syftet har varit att utan förkunskap om deponierna och med utgångspunkt från de iakttagelser och erfarenheterna som man har från fältmätningarna av de sju deponierna i Sverige utföra fältmätning av gasemissioner samt tillämpa och testa de i Sverige utvecklade fältmetodernas användbarhet och begränsningar.
 - Till skillnad från fältmätningarna för deponierna i Sverige utförs fältmätningarna i Frankrike som översiktlig skanning av totala deponiytan, inkluderande överyta (plan yta) och slänter. Fältmätning görs även för ytor som gränsar till deponiytorna i syfte att detektera och avgränsa objekt/ytor som kan bidra med metanemissioner, trots att de ligger utanför deponiområdet.
 - I likhet med deponierna i Sverige utförs en översiktlig linje-skanning enligt en visuellt avgränsad linjedragning. Speciell uppmärksamhet ägnas gränsskikten vid släntkrön och släntfot samt installationer för gasuttag, lakvattensystem, gasbrunnar, lakvattenbrunnar etc.
 - Detaljerad fältmätning, s.k. pinpointing, utförs för att spåra, detektera, mäta gaskoncentration, och lägesbestämma läckagekällor. Lägesbestämning görs indirekt med notering på detaljerad deponikarta. GPS fanns inte tillgänglig vid de två franska deponierna.
 - I likhet med de svenska deponierna görs kompletterande mätning av fältreferensdata samt fältmätning med FLIRs ThermoCAM™ GasFindIR LW för ett urval objekt/ytor i syfte att detektera, visualisera och studera spridningsbilden hos metangas för olika typer av läckagekällor.
 - Mätning av gasflöden med aktiv och dynamisk kammare utförs för ett urval delytor. Parallellt med mätning med kammarmetoden utförs fältmätning med laser, direkt före och direkt efter att kammarna placerats på respektive avlägsnats från mätytan. Parallellt med mätning med kammarmetoden görs jämförande lasermätning dels för hela delytan och dels för kammarytorna.

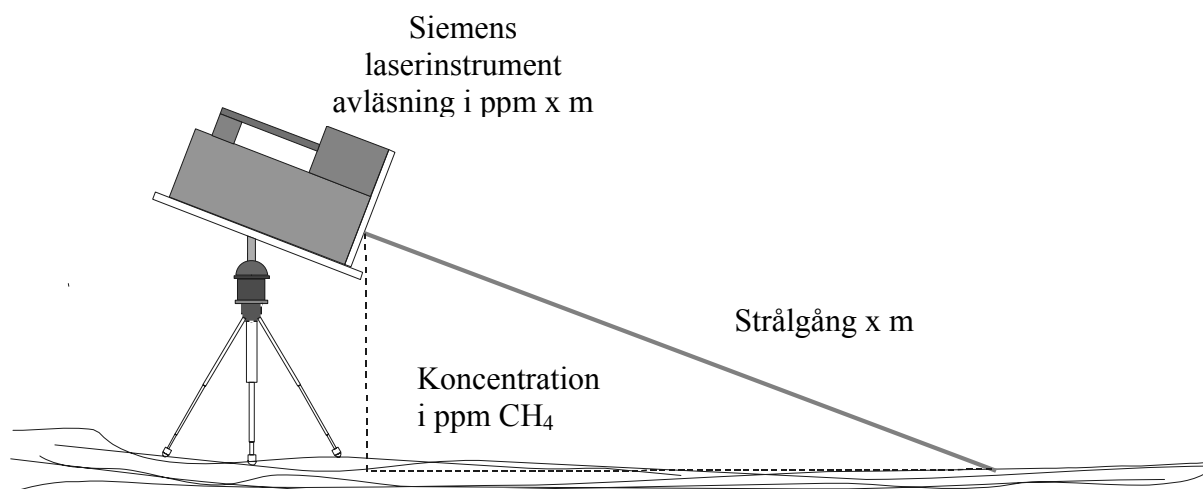
All lägesrelaterad data från lasermätningar, från fältreferensmätningar och iakttagelser i fält dokumenteras på deponi-CAD-karta som också används som fältprotokoll. Här noteras t.ex. iakttagelser om punktutsläpp, diffus gasemission från avgränsbar yta, gasemissioner från sprickbildningar eller från gasuttagssystem och lakvattensystem, samt gasemissioner från hål eller bristfälliga anslutningar/skarvar för plastbelagd men icke sluttäckt cell/delyta.

10.3 Användning av fältmätningssutrustning

Laserinstrumentet

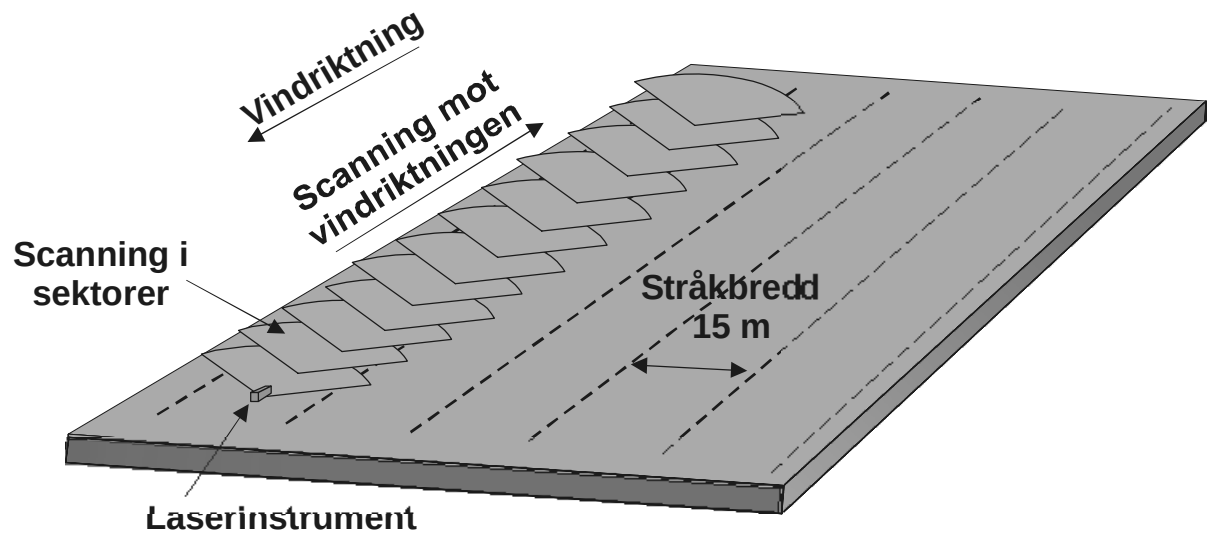
Den snabba skanning som kan göras med laserinstrumentet från Siemens innebär att metanemission från deponierna kan upptäckas. Mätresultatet utgörs av koncentration av metan i luften ovan ytan av deponin mäts var tiondels sekund utefter en strålgång. Koncentrationen anges i ppm x m. Se förenklat i figur 10.4.

Om det registrerade värdet i ppm x m divideras med 2 x strålgångens längd erhålls ett medelsvärde på metankoncentrationen i luften längs strålgången, uttryckt i ppm.



Figur 10.4. Mätning med laserinstrumentet.

Det första arbetsmomentet förutom inventering av uppgifter om storlek, avfallsmängder var att göra en heltäckande ytskanning med laserinstrumentet av hela undersökningsområdet. Laserinstrumentet förs i svepande rörelser fram och tillbaka så att strålgången träffar markytan ca 10 m framför operatören. Operatören har på förhand gjort upp stråk så att laserinstrumentet förs i de svepande rörelserna samt framåt mot vinden, se arbetsprincipen i figur 10.5. Där koncentrationer över bakgrunds nivåerna erhålls intensifieras svepningen i den riktning som de högre koncentrationerna erhålls, samtidigt som operatören går i riktningen fram till läckagekällan. Läckaget markeras med en stakkäpp för senare detaljerad inmätning.

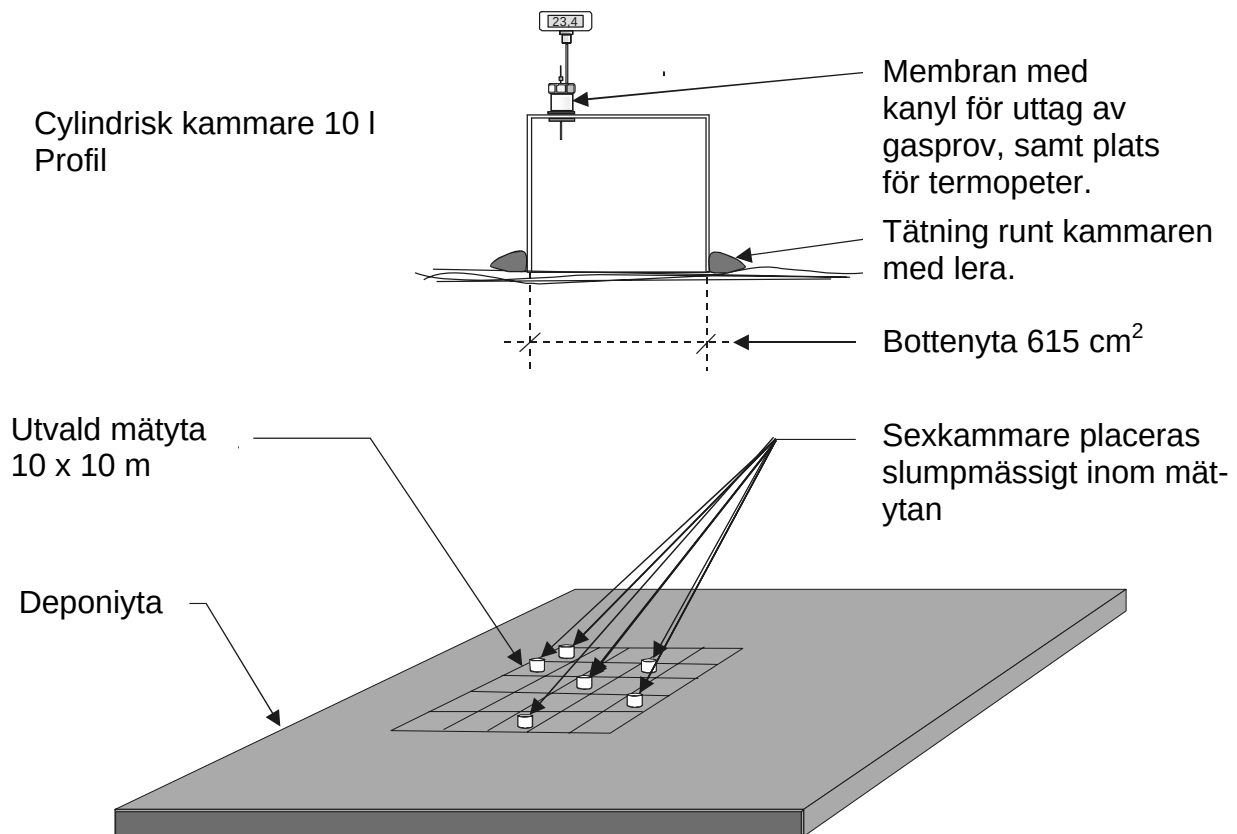


Figur 10.5. Arbetssättet vid skanning med laserinstrumentet. Operatören går sakta i stråkets riktning mot vinden och sveper med instrumentet åt båda sidor.

Kammarmetoden

Vanligtvis görs en undersökning över en areal på 100 m^2 . En eller flera typytor väljs vid varje deponi. Proceduren startas genom att ett rutnät läggs ut över en representativ del av ytan där utflödet skall bestämmas. Sedan utväljs ett antal delytor stokastiskt där kammarmätningen utförs. På varje delyta sätts en kammare och mätning utförs.

Den mätning med kammarmetod som använts i detta projekt framgår av figur 10.6.



Figur 10.6. Cylindrisk kammare med uttag för gasprover, mätyta på deponi. Små gasprover tas under 2, 4, 8, 16 och 32 minuters intervall, efter placering och tätning av kammaren på deponiytan.

Metoden ger indikation om gasemissionen på den valda kammarytan och vid mättillfället. För att ge god precision som täcker all emission måste ett stort antal upprepade mätningar göras på olika platser och under olika väderleksförhållanden (Börjesson, och Svensson, 1997).

Vid höga emissionsnivaer är den statiska kammaren osäker då den inte finns tillräcklig tid för att få bra indikation på den lineära koncentrationshöjningen i kammaren. Istället är då en dynamisk kammare bättre, men för situationer då konvektiv utströmning föreligger kan istället insamling av gasen i en tät påse under en bestämd tid vara en lösning.

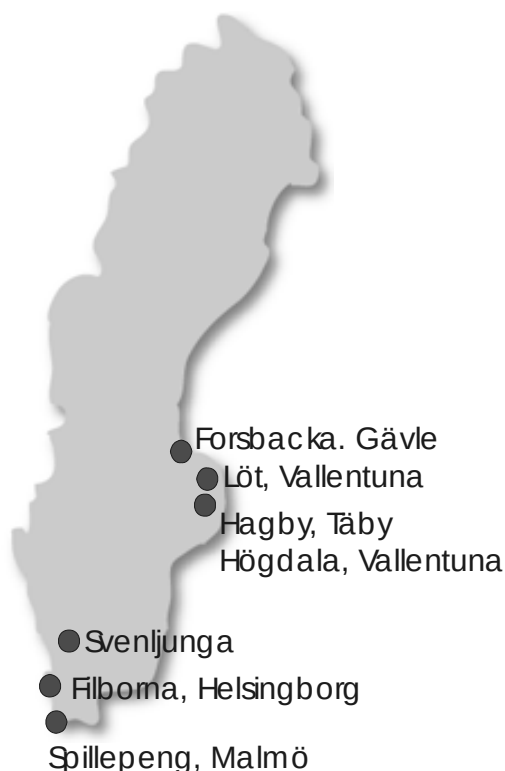
11 VAL AV UNDERSÖKNINGSOBJEKT OCH DEPONIYTOR

11.1 Allmänt

Mätningar med VOGUE-laser och FLIR GasFindIR har utförts i Sverige på sex deponeringsanläggningar med gasutvinningssystem och på en mindre deponi utan gasuppsamling. De valda anläggningarna har olika volym och utbredning och är olika vad avser gasgenerering och metanemission. Deponierna som har undersökts under olika årstider ligger i olika klimatområden i Sverige, se lokalisering i figur 11.1. Fyra av deponierna har

också kontrollerats med hjälp av kammarmetoden för bestämning av metanemissionens storlek.

Mätningar med laser och IR-teknik har som redovisats i avsnitt 10.3 också utförts vid två deponier i norra Frankrike. För dessa deponier utfördes heltäckande skanning, pinpointing av specifika metanläckage objekt samt kammarmetodmätningar.



Figur 11.1. Undersökta deponianläggningar i Sverige.

Alla fältmätningar inklusive kammarmätningar och geoelektricitetsmätningar planerades och utfördes i samråd mellan ansvariga för respektive deponi och tillsammans med dem som utfört specialmätningarna (kammarmetoden, geoelektricitetsmetoden etc.). Planering, genomförande och analys av fältmätningar och fältdata utfördes av operatörerna inom projektet och diskuterades för konsensusbeslut under gemensamma arbetsmöten som förlagts till respektive deponi. De två deponierna i Frankrike deltog med representanter för SITA Frankrike och SITA Sverige vid arbetsgruppsmötena i Sverige. Detta innebar att kompetens vid respektive deponin medverkade tidigt i projektarbetet.

Varje enskild deponi bidrog under merparten av projekttiden med specialkompetens och med kompletterande arbetskraft vid fältmätningarna. I de fall frågor uppstod kring deponin av vikt för planering och genomförande av fältmätningarna så bistod personal från olika nivåer i organisationen i deponin i projektarbetet. Det kunde röra sig om enkla frågor om uttagsnivåer på metangas, tryck i gasuttagssystemet, men även frågor om driftpersonalen iakttagelser om lokaliseringen av lukt av gas vid olika atmosfäriska tillstånd, avsmältning av snö eller

förekomst av vegetationsfria ytor som indikation på metanläckage från tippen, medverkan vid specialmätningar av t.ex. syre och gasemissioner från lakvattendammar etc.

Kompletterande mätningar för olika specialobjekt, typ mätning av metanemissioner i samband med flyttning av gamla deponimassor från gamla deponin vid Ringstorp i Helsingborg, referensmätning av metanemissioner från Högdala deponin med facklan i funktion, referensmätning av metanemissioner från lakvattendammen, LD1, med luftarna på etc.

En utförlig beskrivning av deponierna ingående i denna undersökning finns i bilaga 4. Nedan beskrivs vilka deponier som ingår samt dess viktigaste data.

11.2 Sammanställning av data från anläggningarna

I de följande tre tabellerna har förhållanden om fysiska data (storlek m.m.), ytbeskaffenhet på deponierna samt gasbildning, uttag sammanställts. Uppgifterna har inhämtats från olika håll. De geometriska data som använts är framför allt inhämtade från de karteringar som varje deponiägare utfört. Beskrivning av ytförhållanden som här bara kan beskrivas översiktligt, kommer från de okulära besiktningar som utförts i samband med de mätningar som utförts vid deponierna samt karteringar. Uppgifter om gasuttag, emissioner kommer dels från EPERs nationella databaser och vad avser Filborna, Löt och Hagby de mätningar som deponiägaren låtit utföra med hjälp av konsult (Fluxosense). I vissa fall har egna beräkningar utförts vad avser gasbildningen med hjälp av LANDGEM, en enkel beräkningsmetod för framtagande av gasbildningen för en deponi.

Tabell 11.1 beskriver de geometriska förhållandena, framför allt storleken på de ingående deponierna. Som framgår av tabell 11.1 är deponierna mycket olika i storlek. Vid samtliga har blandat hushålls- och industriavfall deponerats, vid flertal av dem under mycket lång tid. F1 och F2 är de två franska deponierna vilka beskrivs under kapitel 15.

Tabell 11.1. Geometriska förhållanden.

Deponi	Deponeringstid	Yta [ha]	Höjd [m]	Volym [m ³]
Spillepeng, 6 st testceller	1988-1989	1	7	25 250
Filborna	1951-2008	35	45	11 000 000
Hagby, etapp I och II	1989-1990	32	10 resp. 25	3 200 000
Löt, norra delen	1995-2000	6	25	380 000
Forsbacka	1995-2008	12	17	1 500 000
Svenljunga	1975-2008	12	10	500 000
Högdala	1969-1999	30	20	2 000 000
F1, mätt del	1975-	18,7	12	1 000 000
F2	1946-	18,5	30	3 000 000

Tabell 11.2. Ytförhållanden.

Deponi	Andel [%]		Täckningsmaterial	
	Slänter	Överyta	Slänter	Överyta
Spillepeng, 6 st testceller	0	100	Inga slänter	Moränlera 1,0-1,5 m, kompl. med ny täckning med slam, jord
Filborna	36	64	Jord, mycket varierande mäktighet och kvalitet	Sluttäckt område, varierande kvalitet av mellantäckning 0,5-1,0 m
Hagby, etapp I och II	0	100	Täckning	Täckning
Löt, norra delen	86	14	Varierande täckning	Varierande täckning
Forsbacka	49	51	Varierande täckning	Varierande täckning
Svenljunga	39	61	Täckta slänter	Täckt överyta, ej täckt slamlagun
Högdala			Sluttäckning	Sluttäckning
F1, mätt del	13	87	Relativt väl täckta slänter	Jämna, täckta överytor
F2	51	49	Från bra täckning till mycket tunt täckta partier	Mestadels 1,0 m jordmaterial

Tabell 11.3. Deponigasförhållanden, utifrån beräkningar och uppgivna mängder, ton CH₄/år.

Deponi	Gasgenerering, beräknad [ton/år]	Uppsamlad mängd [ton/år]	Emission [ton/år]	Gasuppsamling del [%]
Spillepeng, 6 st testceller	40	38	2	95
Filborna, 2007	7086	5291	1 611	75
Hagby, etapp I och II, 2007	1025	210	666	20
Löt, 2007	1034	385	613	37
Forsbacka, 2005			1 586	
Svenljunga	450	0	400	0
Högdala				
F1, 2005	2720	2385	331	88
F2, 2005	5660	4036	1 620	71

Tabell 11.2 framställer ytförhållandena översiktligt. Det är vår uppfattning att inom ytdelarna slänt respektive överyta finns betydande spridning vad avser yttäckningens kvalitet.

Kvaliteten och vilka material som förekommer kommer delvis att beskrivas närmare i varje del av fältundersökningarna.

Slutligen beskriver tabell 11.3 gasbildning och gasuttag vid anläggningarna översiktligt. Beräkningarnas kvalitet är olika, men utgör de bästa som kan nås utan ytterligare undersökningar. Inom deponierna kan betydande skillnader förekomma. Det finns troligen avsnitt där gasuppsamlingen är nära 100 %, och inom samma deponi områden där uppsamlingen är närmast obefintlig. Lika så varierar gasuttaget i tiden inom vida ramar, de angivna värdena utgör uttag respektive emission för hela år ofta grundat på ett enstaka mättillfälle. Uppsamlingen av deponigas från Spillepengs testceller som visas i tabellen är efter ombyggnaden 2007.

12 UTFÖRDA FÄLTMÄTNINGAR MED LASER OCH IR-INSTRUMENT

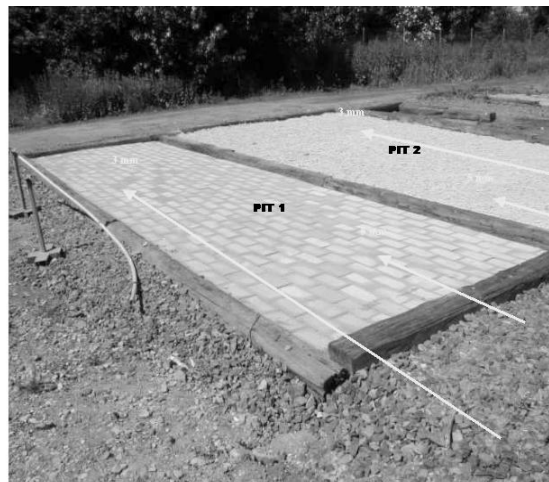
12.1 Resultat från fältlaborativa mätningar vid Malmö Brandkårs gasövningsplats

I syfte att försöka bestämma mättekniska egenskaper hos VOGUE Siemens AG, CT PS 8 laser system och FLIRs ThermaCAM™ GasFindIR-system utfördes i början av projektet fältlaborativa studier av gasemissioner från simulerade metangasläckage utförda under kontrollerbara mätförhållanden vid Malmö Brandkårs gasövningsplats (se även redovisning i avsnitt 9.2). Fältlaboratoriet i Malmö konstruerades för simulering av gasemissioner under förstudier för markbaserad och flygburen gasdetektering och under VOGUE-projektet.

De fältlaborativa mätningarna begränsades dels till en kvadratisk yta med fyra gasledningarna lokaliserade 10 cm under mark, med 1, 3, och 8 mm hål, och med grov singel som täck- och ytmaterial, dels till två rektangulära ytor med två gasledningarna lokaliserade 80 cm under markyta och med 3 respektive 5 mm hål. En av de rektangulära kulvertgravarna har fin sand som fyllnadsmaterial och betongplattor som ytmaterial. Den andra kulvertgraven har jordmassor som fyllnadsmaterial och fin singel som ytmaterial (figur 12.1 v-h). Kulvertdimension DN63.

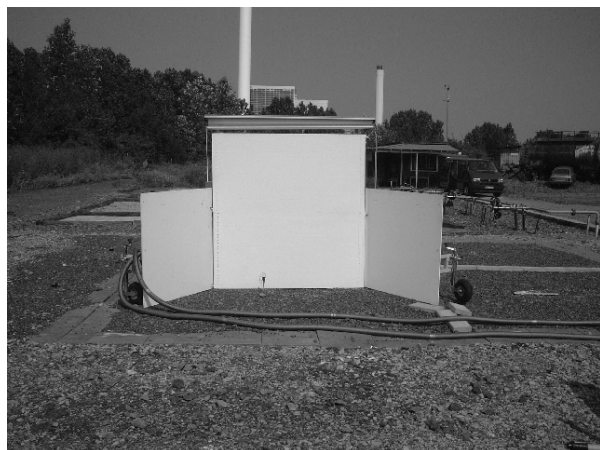


Figur 12.1. v. Kvadratisk fältsmätare med 4 kvadranter, en gaskulvert med 1, 3, 5 resp. 8 mm hål, placerade 10 cm under markytan, ytmaterial grov singel.



h. Två rektangulära fältsmätare med 2 gaskulvertar i vardera, placerade på 80 cm djup, med 3 och 5 mm hål, fin sand respektive jord som fyllnadsmassor, och betongplattor resp. fin singel som ytmaterial. Kulvertdimension DN63.

Fältslaborativa mätningar utfördes under perioden 06-07-16 – 06-07-18 under för mätningarna gynnsamma väder- och utstrålningsförhållanden, med en varierande vindhastighet på 0,5-2 m/s, molnfri himmel med en himmelsstrålningstemperatur på -40 - -50 °C, lufttemperatur ≤ 30 °C, och med en gastemperatur som varierade mellan 32-45 °C. ΔT mellan gasen och bakgrundsytan/backscatterytan reglerades med hjälp av en temperaturpanel med datorstyrd reglerutrustning (figur 12.2 v-h).



Figur 12.2. Referenstemperatur panel (v), ansluten till en temperatur regulator (h).

Referenstemperatur-systemet kan opereras inom temperatur intervallet $< 10 - 60$ °C. Den lägre temperatur nivån (< 10 °C etc.) kan regleras ner till den temperatur som finns på det inkommande vattenledningssystemet. I det fall där man önskar en temperatur under fryspunkten måste man komplettera temperatur referens panelen med en kompressor.

Gasläckage simulerades genom hål i gasrör placerade 10 cm under markytan. Gasflödet bestämdes med hjälp av en datorstyrd massflödesregulator (figur 12.3). Mätning av simulerade gasemissioner utfördes för fyra olika gasrör med 1, 3, 5 respektive 8 mm hål som

läckagekälla. Upprepade mätningar utfördes med olika gasflöden för ett och samma läckagehål. Mätningen började med en referensmätning med 0 l/min flöde och fortsatte därefter med 1, 5, 10, 15 respektive 20 l/min för läckageobjektet med 1 mm hål. Samma mätprocedur upprepades därefter för läckageobjekt med 3, 5 respektive 8 mm hål (tabell 12.1).



Figur 12.3_ Brooks “Smart Mass Flow Meter”, 5800 serien, för reglering av metangasflöden (v). Brooks mikroprocessor (0154 BC1B3) för att selektera och kontrollera gas mass-flöde (h).

Före, under och efter varje fältlaborativ mätning med laser- och IR-systemen utfördes kompletterande mätning av fältreferensdata som noterades i fältprotokoll tillsammans med punktvis uppmätta laserdata. Resultat från kontinuerlig mätning av laserdata lagrades i logger för senare analys och tolkning.

Flödesdata relaterades till ppm-data registrerade med Siemens lasersystem. Resultaten från fältmätningarna indikerar att vindhastigheten och vindens rörelser på mikrotopografinivå påverkar metangasens beteende och därmed mätresultatet. Mätresultatet varierar också med storleken på läckagekällan, gasflöde, gas- och atmosfärstryck. Vid upprepad simulering av gasläckage från 1 mm hålet kunde noteras stora variationer i uppmätta mätdata från 200-2000 ppm x m registrerade från ca 2,5 m avstånd vid ett och samma flöde av 1 l/min (tabell 12.1). Vidare noterades minskade ppm-värden vid ökning av flödet i etapper upp till 20 l/min. Minskningen av uppmätt gaskoncentration vid stora flöden och små/trånga läckagekällor kan förklaras av att det uppstår en jetstråle då en ökad mängd gas passerar genom det trånga läckagehålet, här på 1 mm. Gaspolymeren vid utläppskällan blir smal och tar en mer utbredd form på 1-2 m höjd från det trånga läckagehålet med gasröret lokaliserat ca 1 dm under markytan. Liknande iakttagelser har gjorts vid simulering av läckage av biogas vid fältlaboratoriet vid Filbornadeponin, och vid iakttagelser av metanemissioner från smala knappt synbara sprickor i ytskiktet hos olika deponier. Jämförande mätning av simulerade metanemissioner från läckageobjekt med större hål som t.ex. 8 mm uppvisar ppm-värden som ligger lågt vid låga flöden och ökar med ökat flöde, 1 l/min = 20-600 ppm mot 100-3000 ppm för ett flöde på 20 l/min, tabell 12.1. Notera dock att det finns en stor spännvidd på mätdata/ppm-värdena för såväl 1 l/min flödet som för 8 l/min flödet. Även här har liknande iakttagelser gjorts vid simulering av emissioner av biogas vid fältlaboratoriet, Filborna.

Tabell 12.1. Passiv och aktiv gasdetektering, mätprotokoll.

Mätprotokoll: **Nr. 1.** BARBARA, VOGUE-laser +FLIR-GasFinder-IR, Methane gas, Objekt: Grusfält, 1hål på vardera 4 gaskulvert, Datum: 06-07-16

Lasern är riktad mot gaskällan på ca 2,5 m håll, snett mot vindriktningen.

Bildnr/ Disk	Tidp.	Flöde	Obj.	YtT	ΔT_{Y-G}	GasT	ΔT_{G-L}	LuftT	PanelT	ΔT_{P-G}	H-T	RefT 1	Laser	GasP	Vindh	Vindr	Rel.
Rec.nr.												Marken					luft.
		[l/min]	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	PPM-m		[m/s]		[%]
Ref.måtn/utan gas	14 ⁰⁰	0	1	57,5	0				28,5		-42,0	47,0	200-2000		0,5-1,0	NW	
0-45	?	1	1	54	15	39			27,1		-45,0	31,5	200-2000		1	NW	
-2710		5	1	54	15	39			27,1		-45,0	31,5	200-2000		1	NW	
-22024	14 ³⁵	1	1	52	6	46			32,9		-44,0	36,0	50-500		2-2,5	NW	
-24823	14 ³⁹	5	1	50	16	34			32		-44,0	34,0	500-100		0-0,25	NW	
-32804	15 ⁰³	10	1	51	18	33			33,5		-44,5	34,6	10-800		1	NW	
-433324	15 ⁰⁷	15	1	52	9,9	42,1			30,6		-44,7	34,2	10-600		0,5-1	NW	
-153020?	15:12	20	1	52	12	40			30,0		-44,4	34,0	100-700		0,5	NW	
Refmätning *	15 ⁴²	0	3	50	-	-			35,6		-42,6	33,6	-		0,5	NW	
-63809?	15 ⁴⁵	1	3	51,6	5,9	45,7			36,8		-42,4	33,0	10-2000		0,5	NW	
-72620	15 ⁴⁷	5	3	53	6	47			35,5		-42,6	34,4	50-2900		1-2	NW	
-80113	15 ⁵⁰	10	3	50	3	47			36,2		-43,2	35,0	50-2000*		1-1,5	NW	
-85109	15 ⁵⁴	15	3	48	3	45			35,0		-43,0	33,7	50-3000*		1,5-2,0	NW	
-91807	15 ⁵⁶	20	3	50	5	45			35,0		-42,8	34,2	50-3500*		1-1,5	NW	

Kraftig solinstrålning, varierande vind, N-NW, vindturbulens vid markytan, kraftig turbulens= 15⁰⁷. * vid refmätning=solen rakt på temperatur-referens-panelen. * -80113/15⁵⁰ lasern riktad ”nedströms” om gaskällan.

Mätning för test och bestämning av detekterbarhetsgränsen relaterat till avstånd mellan gasläckage och lasersystemets position utfördes med gasläckage simulerat utan gasflödesregulator. Exempel på resultatet från mätning på olika avstånd mellan laser och gasläckagekällan redovisas nedan:

1 mm hål - 1 l/min - 10 m avstånd =	gas detekterbar
1 mm hål - 1 l/min - 20 m avstånd =	gas ej detekterbar
1 mm hål - 5 l/min -10, 20, 30 m avstånd=	gas detekterbar
1 mm hål -10 l/min-10 m avstånd=	gas detekterbar
1 mm hål -10 l/min-20 - 30 m avstånd=	gas ej detekterbar (kraftig turbulens vid markytan)

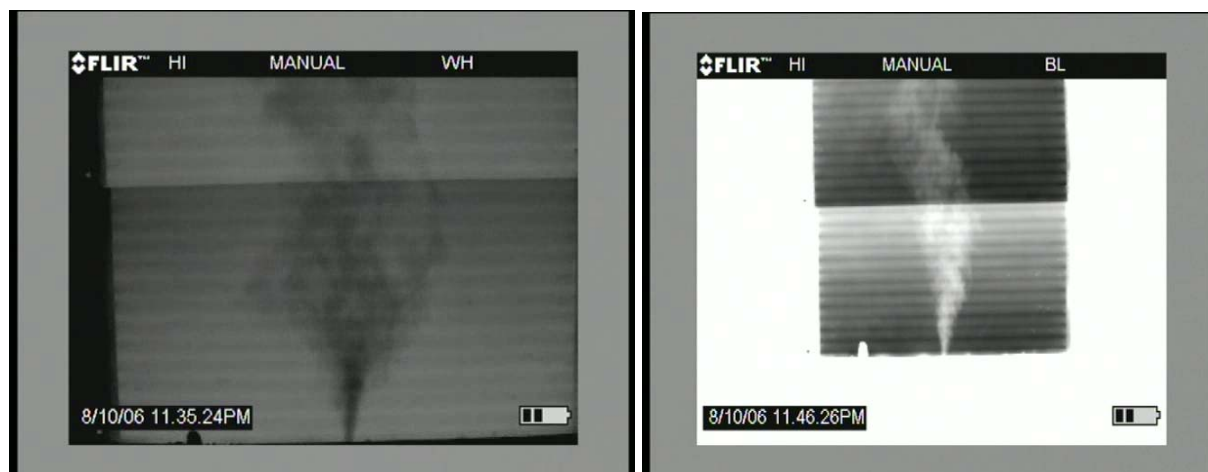
Laserdata från de fältlaborativa försöken med simulerade gasemissioner lagrades i fältlogger för senare analys och utvärdering. Kompletterande IR-data från mätning med FLIRs IR-GasFinder system lagrades i realtid digitalt på en DVD-enhet.

IR-detektering med IR-GasFinder systemet

Presentation av gasrelaterade IR-data i en skriftlig rapport är svår att göra på ett sätt som illustrerar GasFinder systemets informationspotential och som framställer dynamiken i värmebildsdata. Ett sätt att presentera IR-data i ett skriftligt dokument är att ur den digitala videofilmen fånga in och frysa den bildsekvens som bäst avbildar gasplymen för ett läckageobjekt vid en specifik mättidpunkt. Informationspotentialen hos gasrelaterade IR-data redovisas dock bäst genom studier av videofilmen presenterad i en elektronisk rapport.

Figur 12.4 visar en fryst värmebild med metanemissioner registrerade med FLIRs IR-GasFinder som resultat av simulering av metanläckage utförd vid fältlaboratoriet vid gasövningsplatsen, Malmö Brandkår. När temperaturen på gasen är lägre än hos temperatur-

referenspanelen avbildas gasplymen i mörk gråton, respektive i ljus gråton när gastemperaturen är högre. Figur 12.4 visar också exempel på metanemission i vertikalled förorsakad av skillnader i tryck mellan metangasen och atmosfären genom påtvingad konvektion. Vid stora tryckskillnader mellan metangasen och atmosfären och där gasen emitterar med högt tryck uppstår en jetstråle och i fallet med högt atmosfärstryck och lågt gastryck dämpas den påtvingade konvektionen och metangasen emitterar horisontalt beroende på rådande vindförhållanden. Liknande bilder har genererats från fältmätningar av gasemissioner från olika läckageobjekt på deponierna såväl i Sverige som i Frankrike, figur 12.47, 12.48, och från förstudierna presenterade i avsnitt 9.3, t.ex. figur 9.5.



Figur 12.4. Värmebilder från fältlaborativa mätningar vid gasövningsplatsen, Malmö brandkår som illustrerar skillnader i gråtonsnianser hos gasplymen relaterad till skillnader i temperaturen hos metangasen relativt omgivningstemperaturen. Gasplymen i vänstra värmebilden har mörk gråton = lägre temperatur än referenstemperaturpanelen och högra värmebilden ljus gråton = högre temperatur än referenstemperaturpanelen, se vidare avsnitt 12.5.2, figurerna 12.40, 12.41.

12.2 *Slutsats från fältlaborativa test vid Malmö Brandkårs gasövningsplats*

Resultatet från de fältlaborativa mätningarna indikerar att metangasen är lätt och flyktig relativt omgivande luft vilket medför att det är svårt att bestämma sambandet mellan ppm-data och flödesdata med det aktuella lasersystemet.

Resultat från passiv gasdetektering med IR-GasFinder bekräftar att metan är en flyktig gas som påverkas både av skillnader i temperatur mellan gasen och omgivande temperatur genom s.k. naturlig konvektion och av tryckskillnader mellan metangasen och atmosfären där höga flöden och trånga passager/små läckagehål ger upphov till en jetstråle där gasplymen utvecklas vertikalt genom påtvingad konvektion. Eftersom metangas inte är synlig för det mänskliga ögat så medför fallet med tryckskillnader att operatören med lasern får svårare att hitta läckagekällan än vid fallet med naturlig konvektion med horisontellt utvecklade gasplymer. Resultaten från de fältlaborativa mätningarna indikerar att detektering av metanemissioner med IR-GasFinder är ett bra komplement till lasermätningar för att visualisera metanemissioner och synliggöra förekomst av gasemissioner genom naturlig respektive påtvingad konvektion (jetstråle).

12.3 *Resultat från fältmätning av metanemissioner från avfallsdeponier i Sverige och i Frankrike*

Som framgår av avsnitt 8.2 och kapitel 9 så har fältmätningarna av metanemissioner från avfallsdeponier i Sverige med laser- respektive IR-system avgränsats till detaljerad mätning av ett urval typytor, gas- och lakvattensystem medan fältmätningarna för deponierna i Frankrike inkluderat översiktlig skanning av hela deponier och detaljerad mätning för ett urval typytor, gas- och lakvattensystem.

Med typytor avses här ytor som till sin form och förekomst skiljer sig från varandra och är representativa för merparten förekommande deponier i Sverige. Syftet med att välja ut representativa typytor är att de förmodas ge gasemissioner som avviker från varandra och att resultatet från de olika typytorna sammantaget förväntas ge en samlad bild av gasemissioner från deponier med likartade typytor, metanproduktion och täckningsförfarande.

Nedan redovisas exempel på resultat från representativa typytor från de olika deponierna i Sverige och från översiktlig skanning och detaljerad fältmätning för respektive deponi i Frankrike.

12.4 *Metanemissioner från typytor*

Begreppet typytor inkluderar överyta (plan deponiyta), slänt (flack eller brant), släntfot, släntkrön och terrasserad slänt. En slänt består i uppbyggnadsskedet av en etappvis sluttande yta som får en terrasserad struktur genom uppbyggnaden av olika på varandra placerade pallar. Detta innebär att på en slänt kan återfinnas mindre terrasser med släntkrön som angränsar till en överyta samt en släntfot som planar ut mot omgivande naturomgivning ofta med mellanliggande lakvattendiken/dräner. Ett resultat från utförda fältmätningar indikerar att det kan förekomma sättningar med sprickbildning och gasemissioner i anslutningen mellan terrasser och pallplanen utmed en slänt. En slänt kan vara flack eller brant.

12.4.1 Metanemissioner från överyta – mätning med laser och IR-teknik

Fältmätning med skanning av lasersystemet och pinpointing har utförts för överytor hos samtliga svenska deponier inom projektet. Här redovisas resultatet från fältmätningarna för ett urval överytor som illustrerar resultat, användbarhet och begränsningar hos modern fjärranalysteknik, typ VOGUE Siemens AG, CT PS 8 laser system och FLIRs ThermoCAM™ GasFindIR-system för detektering och kartläggning av gasemissioner från stora sammanhängande plana deponiytor. Redovisningen avgränsas till: a) Icke täckt överyta, b) Täckt överyta, c) Tipsår-överyta, d) Plasttäckt överyta.

a) Forsbacka, F2-området (sprickzon) representerar en **icke sluttäckt överyta** på totalt ca 1200 m² m med blandat hushållsavfall, och med ett 25-30 cm lager av blandat, behandlat förorenad jord som täckskikt. Merparten av överytan är vegetationsfri. I områdets övre västra del förekommer sprickor förorsakade av sättning i deponimaterialet. Här finns bl.a. en ca 40 m lång, 2-10 cm bred och 20-30 cm djup, visuellt synlig sprickzon, figur 12.5.



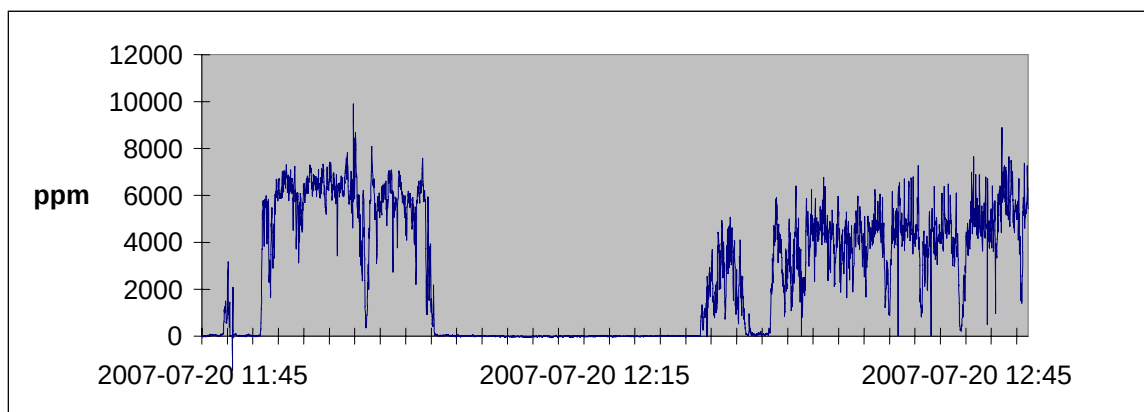
Figur 12.5. Forsbacka, F2-området, överyta på totalt ca 1200 m² m med blandat hushållsavfall, löst täckskikt och sprickzon p.g.a. sättningar i deponin. Mätning med laser samt fältmätutrustning för mätning av fältreferensdata, med logger som lagringsmedia.

Upprepade mätning av gasemissioner har gjorts för F2-området med Siemens lasersystem under olika årstider, väder- och utstrålningsförhållande, med barmark och under vinter med snöförhållanden. Sammanlagt har utförts ca 10 kompletta mätserier samt översiktlig kompletterande mätning för ett urval ytor och läckagekällor, för kontroll av detekterbarheten under speciellt ogynnsamma mätförhållanden med snabba variationer i tryck, nederbörd och vindhastighet. Fältmätningar har utförts under perioden 2006-09-19 – 2007-11-08.

Efter skanning utfördes detaljerad mätning, s.k. pinpointing av de objekt och ytor där skanningmetoden indikerat förekomst av metanläckage. Uppmätta laserdata (ppm-värden) och kompletterande väder- och utstrålningsdata och objektsrelaterade data och iakttagelser om metangasens beteende, fluktuationer i ppm-värden etc. dokumenterades i skriftliga protokoll.

Under fältmätningar 2006 detekterades 8 objekt och ytor med mätbara gasemissioner och till mätperiodens slut, 2007-11-08, utökades antalet till 20 mätobjekt/ytor. Här noterades också att under samma period som nya läckagekällor detekterats kunde ett mindre antal objekt/ytor med tidigare höga ppm-värden ge lägre eller visa inga metanläckage, för att vid ett annat mättillfälle åter ge mätbara metanemissioner. Iakttagelser under den aktuella mätperioden indikerade att metanemissionerna från F2-området kunde variera vid ett och samma mättillfälle, men även under längre perioder. Dessa iakttagelser bekräftades senare genom resultat från upprepade långtidsmätningar.

Resultat från repetitiva detaljerade fältmätningar och långtidsmätningar visar variationer i ppm-värden från 20–10000 ppm. Merparten läckageobjekt vid F2-överytan har vid de aktuella mätperioderna legat på 3000-6000 ppm. Se exempel på resultat från långtidsmätningar, figur 12.6.



Figur 12.6. Exempel på resultat från långtidsmätning som visar variationer i gasemissionen med perioder med höga till inga ppm-värden vilket indikerar variationer i metanproduktionen.

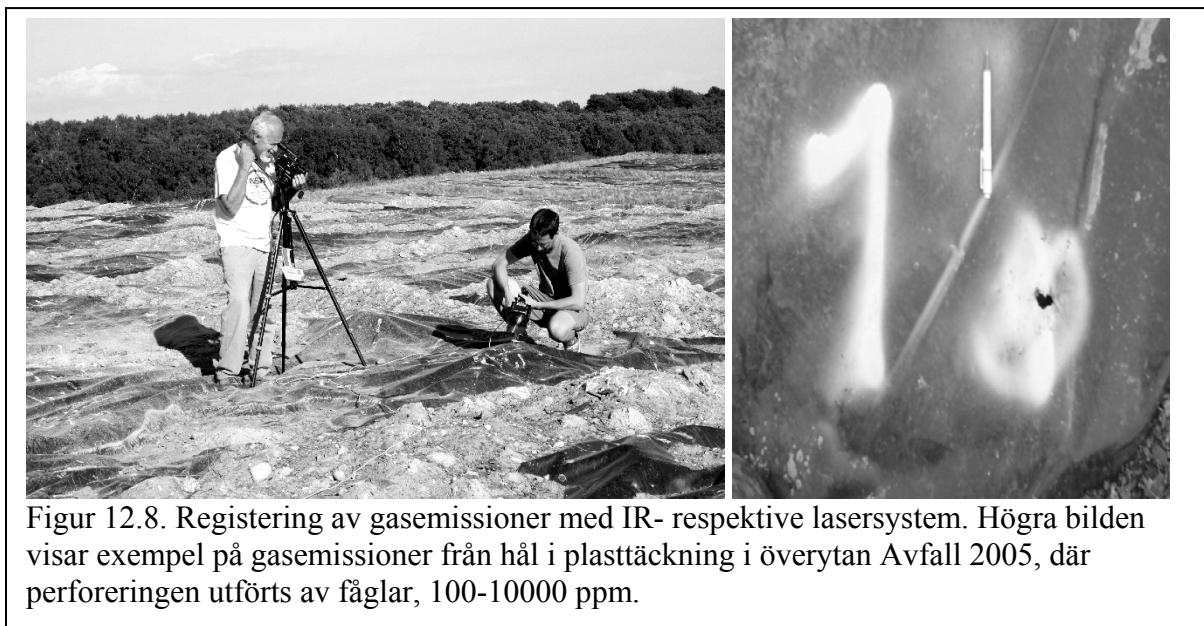
d) Filborna-Avfallslager 2005 representerar en **plasttäckt överyta** på ca 2600 m² (figur 12.7). Täckning med plast för att förhindra infiltration av regnvatten är en vanlig täckmetod i Sverige och internationellt. Plasttäckningen fungerar också som en barriär för infiltration av luft vid uttag av biogas. Normalt utförs en sluttäckning med valda täckmassor ovanpå plasten. I de fall sluttäckning över plasten inte utförts kan uppstickande föremål bland deponimassorna eller fåglar ta hål på plastytan och vatten kan tränga in i deponin och biogas strömma ut. I fallet med Avfallslager 2005 har fiskmåsar perforerat plastytan vilket förorsakat omfattande läckage av biogas från ett stort antal hål i ytskiktet.

I likhet med övriga överytor har detektering och kartläggning av gasemissioner från Avfallslager 2005 utförts först med skanningmetoden för att spåra och kartlägga metanemissioner från hela överytan och därefter med pinpointing för detaljerad mätning av gasemissioner, kartläggning och lägesbestämning av läckageobjekt (figur 12.8).

Perioden 2006-2007 utfördes repetitiva fältmätningar med Siemens lasersystem för att kartlägga gasemissioner från ett urval om 127 läckageobjekt. Resultat från de momentana fältmätningarna visar en variation på 100-10000 ppm. Metangasens spridningsmönster och beteende har registrerats med en IR-Gas-Finder, dokumenterad som videosekvenser.

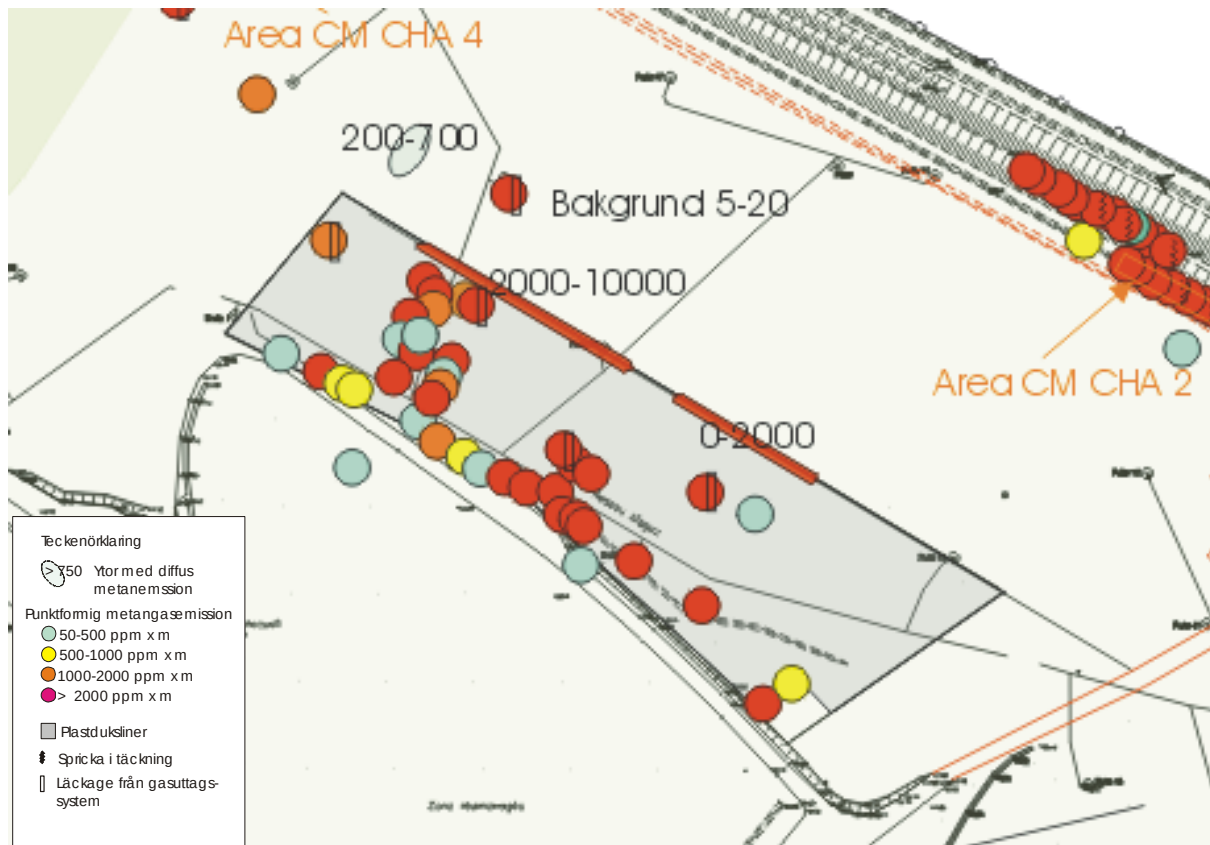


Figur12.7. Filborna-Avfallslager 2005 representerar en plasttäckt överyta på ca 2600 m² där ytskiktet perforerats av fåglar. Gasemissionen för ett urval på 127 objekt/hål har detekterats med Siemens laser-system (100-10000 ppm).



Figur 12.8. Registering av gasemissioner med IR- respektive lasersystem. Högra bilden visar exempel på gasemissioner från hål i plasttäkning i överytan Avfall 2005, där perforeringen utförts av fåglar, 100-10000 ppm.

e) Frankrike Upplag F1 är ett annat exempel på en deponi med **plasttäckt överyta**, på ca 7300 m² (figur 12.9). Fältmätning med Siemens lasersystem och FLIRs IR-GasFinder utfördes under 2 dagar (2007-09-17 – 2007-09-18), med kompletterande fältmätningar den 27 september. För data rörande upplag F1, se avsnitt 11, tabell 11.1.



Figur 12.9. Översiktlig bild på plasttäckta överyta på upplag F1 omfattande ca 7300 m², med gasemissioner från 37 av ca 100 potentiella läckageobjekt, typ hål från uppstickande föremål, bristfälliga skarvar och anslutningar i hörn, fåglar som pickat hål, etc. Läckage finns också vid gasbrunnar inom plastytan. Fältmätning utförd med Siemens lasersystem.

Väder- och utstrålningsförhållanden under mätperioden:

Lufttemperatur: 9-16 °C

Varierande molnförhållanden med molnfri till molntäckt himmel

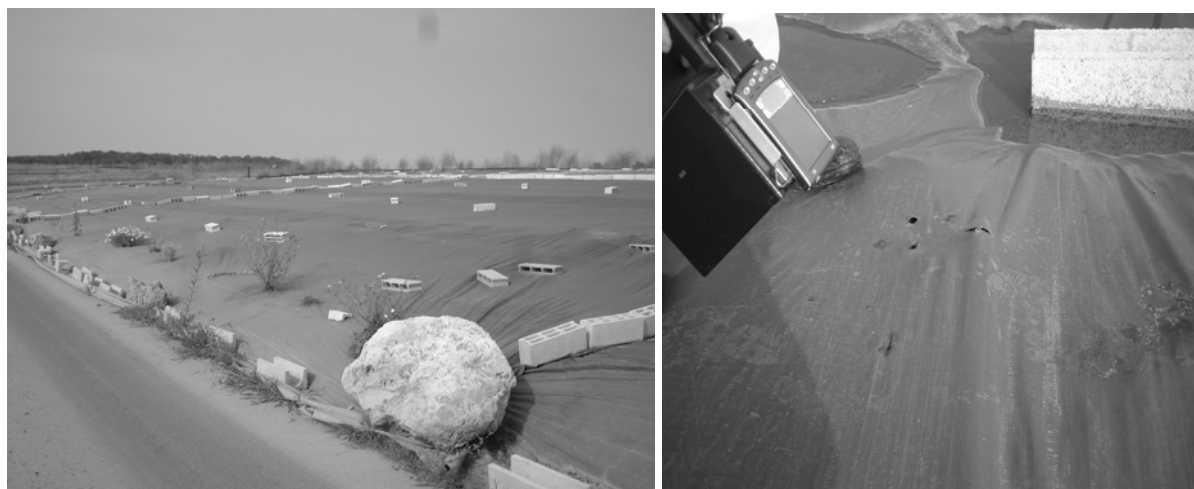
Ingen nederbörd dagtid

N-NW vind, 1-4 m/s

I likhet med plastytan vid Filborna-Avfallslager 2005 uppvisar den plasttäckta överytan vid upplag F1 perforeringar i ytskiktet av täckplasten, förorsakad dels av uppstickande föremål från deponin, bristfälliga skarvar, brister i anslutningar i hörn av plasttäckningen, och dels genom att fåglar pickat hål i plastytan (figurerna 12.10 och 12.11). Vid okulär besiktning av plastytan konstaterades ca 100 synbara hål i plastytan och brister i anslutningar i plasttäckningen. Upprepad fältmätning gav gasemission på 100-8000 ppm från 37 av de totalt 100 okulärt dokumenterade potentiella läckageobjekten.

Notera att gasemissioner från deponier sker i intervaller och lasermätning vid ett måttillfälle kan avvika från ett annat måttillfälle. Iakttagelser från bl.a. mätning av gasemissioner från plasttäckta överyta vid Filborna, objekt Avfall 2005, ovan, indikerar att det vid olika måttillfällen kan förekomma variationer i var och hur mycket metangas som emitteras från

kända potentiella läckageobjekt. De potentiella läckageobjekt vid den plastäckta överytan vid upplag F1 som inte emitterade metangas vid de aktuella mättillfällena kan ge detekterbara emissioner vid andra mättillfällen, och omvänt.



Figur: 12.10-11. Upplag F1, (v) del av plastäckt överyta, och (h) exempel på perforering av plastytan. Resultat från fältmätning med Siemens lasersystem 100-8000 ppm.

12.4.2 Metanemissioner från slänt – mätning med laser och IR-teknik

Preliminära resultat från pilotstudien vid Filborna och resultat från refererad litteratur (Chanton et al, 2007) indikerar att metanemissioner från slänter, släntfot och släntkrön är mer frekvent än från plana deponiytor (överyta). Bedömningen inom projektet har därför varit att utföra mer omfattande studier av dessa typer av deponiytor. Nedan redovisas exempel på metanemissioner från slänt från sex deponier, följt av liknande redovisning för släntfot respektive släntkrön:

a) Filborna, östra slänten består övervägande av blandat hushållsavfall och industriavfall ca 10-30 år gammalt. Slänten har en lutning på ca 1:3 och har en mellantäckning av 0,5-1,0 m blandad jord. Volymerna innanför slänten är anslutna till gasuttagssystemet vid Filborna. De nedre delarna av slänten nås troligen inte av gasuttag. Fälmmätning utförd som skanning med Siemens lasersystem utmed stråk i nord-sydlig riktning omfattande en total yta på 40x300 m = 12 000 m². Fem punktutsläpp upptäcktes vilka markerades med stakkäppar (figur 12.12). Medelvärden för registreringar under ca 1 minut framgår av tabell 12.2.

Tabell 12.2. Resultat från skanning av östra slänten, Filborna.

Punkt	ppm, medelvärde	Observationer
1	1150	Hål i uppstickande plåtfat
2	560	Litet hål ofullständig täckning
3	850	Litet hål
4	2780	Litet hål vid bräda
5	290	Flera hål



Figur 12.12. Översiktlig bild av östra slänten. Som framgår av bilden ligger alla funna punktsläpp ungefär på samma höjd, och relativt långt ned i slänten. Metanläckage upptäcktes också i lakvattenbrunnarna nedan slänten samt vid en högt belägen sammankopplingsbrunn för gas.

b) SYSAV-Spillepeng, västra slänten (Biocell 8/BC8) består av hushållsavfall deponerat omkring år 1990, med ett överliggande pallplan med industriavfall deponerat därefter. BC8 representerar en slänt med detekterbara gasemissioner från förhållandevis smala, visuellt knappt synbara sprickor utmed en ca 100 m lång horisontal sträcka (figur 12.13). Genom skanning och pinpointing med Siemens lasersystem har detekterats emission av metangas från 22 läckagekällor utmed den aktuella sträckan, med metanemissioner från 760-6800 ppm (tabell 12.1, bilaga 6).



Figur 12.13. BC8, Spillepeng. Exempel på en vidsträckt slänt med gasemissioner från 22 läckagekällor med metanmissioner från 760-6800 ppm.

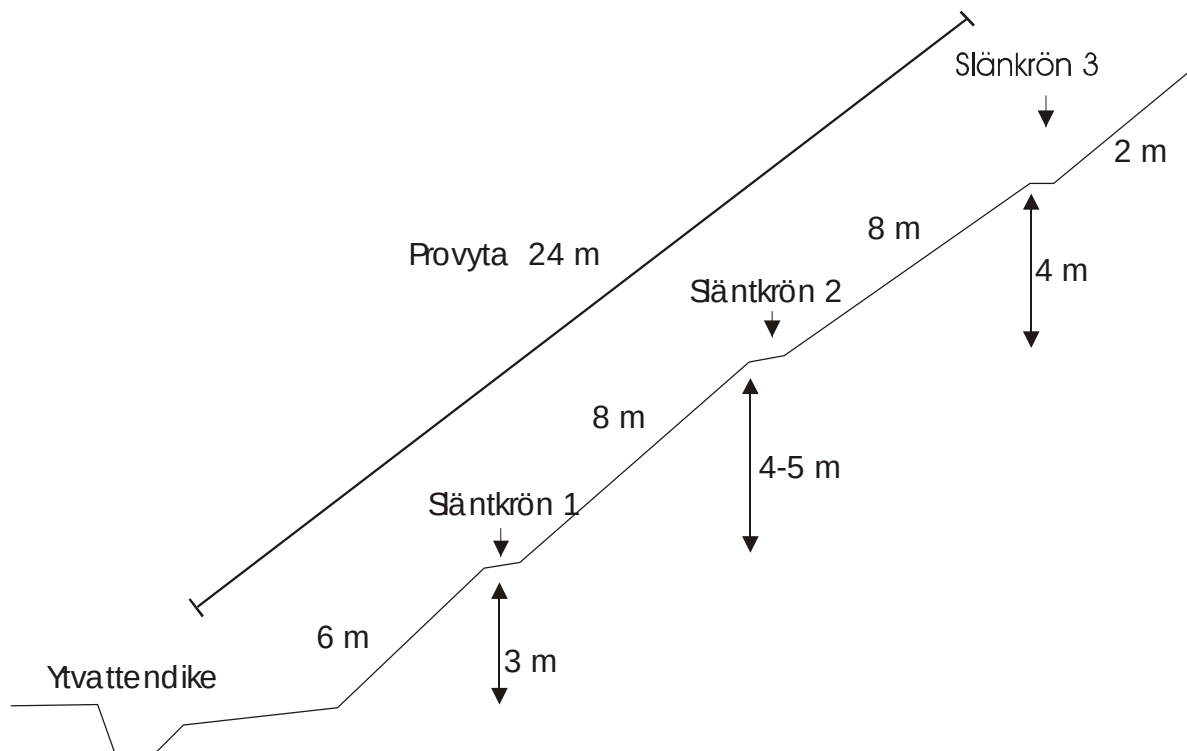
I likhet med iakttagelser vid bl.a. slänt F3 vid Forsbacka deponin, nedan, finns en indikation på att det föreligger ett samband mellan förekomst av en viss mossart (figur 12.15) och emission av metangas. Enligt Lagerkvist (2007) har den aktuella mossarten ett kort rotsystem vilket medför att växten inte utsätts för så mycket metan som växter med ett djupare rotsystem. Fenomenet uppmärksammades vid fältmätningar vid Forsbacka 2006 och fortsatta iakttagelser vid de fältmätningarna bekräftar att mossarten återfinns som enda växtart där metangas emitteras. Växtarten bör följaktligen i likhet med förekomst av gasemissioner vid vegetationsfria ytor kunna användas som indikator på var metangas emitteras genom markytan.



Figur 12.14. visar smala, visuellt knappt synbara sprickor som ger mätbara metanemissioner, samt mossart med kort rotsystem.

c) Löt, västra slänten. Vid deponin Löt finns flera intressanta slänter med varierande metanemissioner. Här avgränsas redovisningen till fältmätningar utförda vid den västra slänten. Slänten är uppbyggd av flera pallar, med slänt, släntkrön och släntfot. Pallplanen har lägre permeabilitet genom att deponimassan pressas samman av kompaktor varför metangasen leds vertikalt ut mot sidorna och emitterar ut främst genom släntkrön och släntfot.

Västra slänten består av en upplagsdel med industriavfall och små mängder hushållsavfall deponerade mellan 1995 och 2001. Slänten består av synliga pallars ytersidor, avgränsade med korta terrasser där slänten inte är efterbehandlad (figur 12.15). Längst ned finns en vall som utgör gräns för lakvattenuppsamling och bottendränering. Lakvattnet leds norrut i två stråk till brunnar i norra kanten av upplagsdelen. Figur 12.16 visar två sammanhängande översiktsbilder på västra slänten, och figur 12.17 visar ett bildkollage med bilder från olika typer av objekt/ytor där metanemissioner detekterats med Siemens lasersystem.



Figur 12.15. Nedre delen av slänten vid Löt, profil, ej skalenlig.

Figur 12.15 visar den nedre delen av slänten vid Löt. Avfallspallarna har en höjd av 3-5 m, och varje pallplan syns tydligt. Den övre delen av slänten är flackare och ytplanering har utförts så att pallplanen inte syns i slänten.

Upprepade fältmätningar har utförts för västra slänten under olika årstider med barmark, snö- och vinterförhållanden, 2006 och 2007. Kompletterande detektering och visualisering av gasemissioner har utförts med FLIR IR-GasFinder för ett urval objekt och ytor för västra slänten.

Jämförande ppm-data från fältmätningar för år 2006 och 2007 finns redovisade i tabell 12.2, bilaga 6. Notera att tabellen visar att ppm-data som indikerar gasemissionens storlek kan variera kraftigt för samma läckage-objekt-yta vid olika mättillfällen, här illustrerat med mätdata från mätserier utförda 2006 respektive 2007. Samma typ av variationer i metanemissioner, fast på mikronivå, har konstaterats vid långtidsmätning för ett och samma objekt/yta vid samma mättillfälle, se exempel från långtidsmätningar.



Figur 12.16. Sammanhängande översiktsbilder med typytor från västra slänten, Lötdeponin, från fältmätning utförd 2006-2007.



L1-03, plastobjekt
 ≥ 6000 ppm



L1-06, mossart
 ≥ 2000 ppm



L2-01-04 översikt
 20-3500 ppm



L2-05, ≥ 3700 ppm



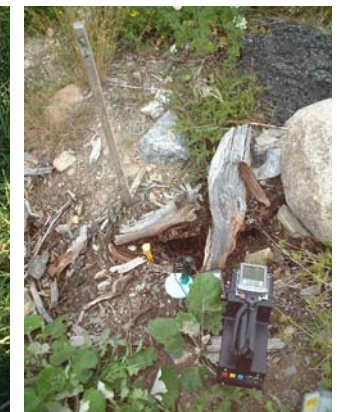
L3-1, ≥ 4000 ppm



L4-1, ≥ 1400 ppm



L5, 1500-7000 ppm



L6-04, 10000 ppm

Figur 12.17. Bildkollage från objekt-ytor med gasemissioner detekterade med Siemens lasersystem, och visualiserade med FLIRs IR-GasFinder. För jämförelse av ppm-data från fältmätningar 2006-2007, se tabell 12.2, bilaga 6.

Vid försök med kompletterande fältmätning av övriga slänter, L6 (södra slänten) och L7 (norra slänten), 2007-11-15 kunde konstateras att dessa slänter planenligt försetts med ett nytt ca 1 m tjockt täcklager av lerblandad jord och att jämförelse med tidigare mätdata därför inte varit möjlig (figur 12.18). Södra slänten (L6) uppvisade efter täckåtgärder metanemissioner på 200-400 ppm mot tidigare 300-10 000 ppm. För norra slänten (L7) kunde inga mätbara metanemissioner noteras efter täckåtgärd. Däremot registrerades luftburna metanemissioner till L6 och L7 transporterade från västra slänten, L1-L5. Resultatet från den kompletterande mätningen 2007-11-15 indikerar att utförda täckningsåtgärder medfört minskad metanemission vid de aktuella slänterna. Figur 12.18 visar södra slänten (L6) före och efter täckåtgärd. Metanemissionerna efter åtgärd fanns främst i de djupa hjulspåren efter dumpersmaskinerna. Enligt driftchefen för anläggningen, är det önskvärt att följa upp med kompletterande lasermätning för att kontrollera effekten på metanemissioner när täckmaterialet satt sig.



Figur 12.18. Löt, södra slänt före täckåtgärd (v), efter täckåtgärd (h), 200-400 ppm jämfört med 300-10 000 ppm, före åtgärd.

d) Forsbacka, södra slänten (F1) består av yttre vallar av de celler som avfallet deponerats i. Avfallet är blandat hushålls- och industriavfall. Slänten är brant och inte utjämnad.

F1- slänten är den slänt som tillsammans med F3-slänten (norra slänten) är det fältområde där flest fältmätningar har utförts, beroende dels på att de aktuella slänterna uppvisar intressanta variationer på metanemissioner. Dels som en effekt av att Forsbacka deponin är lokaliserad så nära Högsolan i Gävle så att den i likhet med Filborna deponin i Helsingborg utgör en av basstationerna där det varit enkelt och snabbt att ta sig till fältmätområdet för att göra repetitiva fältmätningar och studera metangasens beteende under olika atmosfärstryck, väder- och utstrålningsförhållanden.

Upprepade fältmätningar har utförts med Siemens lasersystem under 2006-2007. Fältdata från lasermätningarna har dels dokumenterats i fältprotokoll och dels lagrats i realtid på PC.

Figur 12.19 visar en översikt på del av F1-området. Tidigare refererad mossart återfinns frekvent på F1-området som enda växtart vid partier med metanemissioner, se exempel illustrerat av högra bilden i figur 12.19 samt bildkollaget i figur 12.20.



Figur 12.19. Översikt av F1-området, vänstra bilden. Högra bilden visar exempel på parti med stor utbredning av mossart vid markytor som ansluter till partier/objekt och ytor med metan-emissioner.

Inom F1-slänten har registrerats metanemissioner, dels från sättningar med mindre sprickbildningar vid pallskarvar, dels i anslutning till uppstickande föremål, och dels i anslutningar mellan stenpartier, stenblock och små frilagda/vegetationsfria ytor. Metanemissioner har registrerats för totalt 15 läckageobjekt/ytor, med en stor spannvidd på uppmätta metanemissioner, 15-10 000 ppm, se exempel i bildkollaget (figur 12.20).



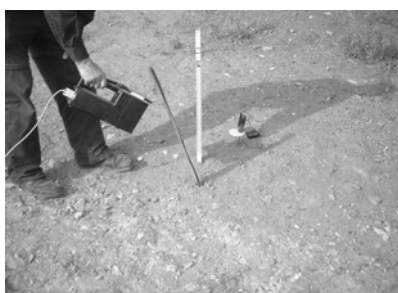
a) metanläckage vid stenparti
500-7000 ppm



b) mossparti, 250 ppm



c) sten- och mossparti,
6000 ppm



d) uppstickande föremål
5000 ppm



e) sten- mossparti,
10000 ppm



d) stenparti i vegetations-
klädd yta, 500 ppm

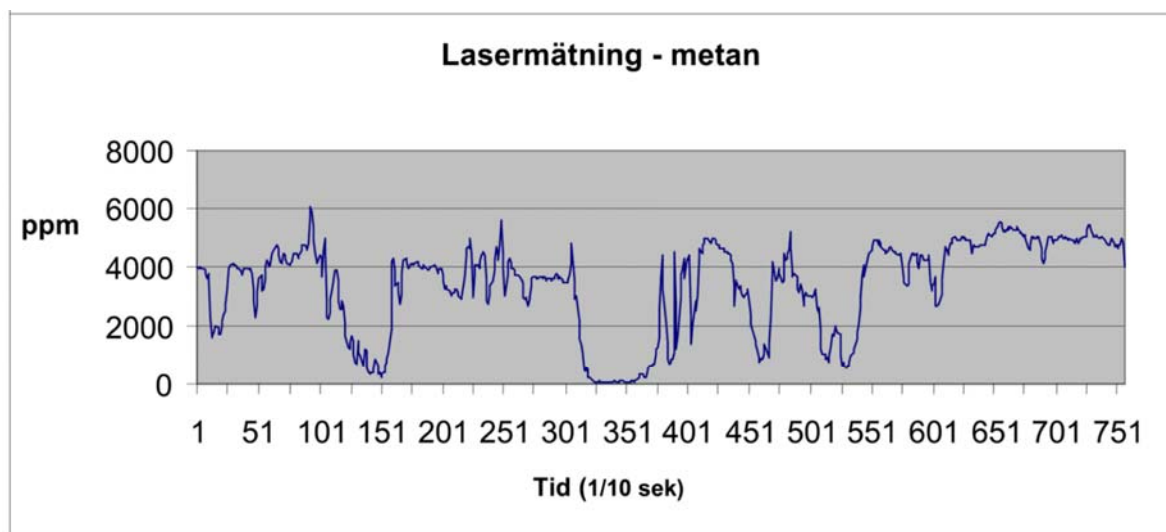
Figur 12.20. Bildkollage för F1-området med varierande ppm-data för olika typer av ytor, från 250-10 000 ppm.

Variationer i metanemissioner/ppm-data från olika läckageobjekt/ylor och typylor förekommer för de flesta icke sluttäckta ylor inom projektet. I likhet med bl.a. västra slänten vid Löt så uppvisar F1-området vid Forsbacka dessutom variationer i metanemissioner/ppm-data för samma mätobjekt/yta vid olika mättillfällen, som t.ex. vid fältmätningar utförd september, 2006 respektive juli, 2007, se tabell 12.3, bilaga 6.

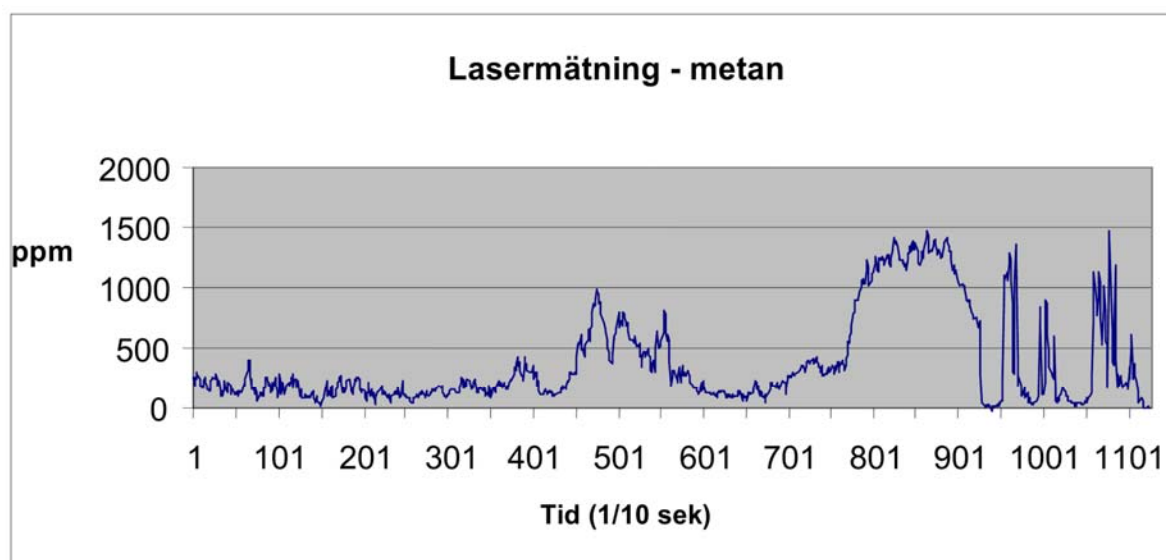
Som redovisats i metodavsnittet 8.2, så utförs fältmätningar med Siemens lasersystem först genom skanning av utvalt deponiområde/deponiyta. Genom skanningförfarandet får operatören en uppfattning om det förekommer metanemissioner inom det avsökt området/deponiytan. Finns indikation på förekomst av mätbara metanemissioner så utförs en detaljerad fältmätning, s.k. pinpointning av objekt/ylor med misstänkt gasemission i syfte att (1) detektera och lokalisera läckagekällan, och (2) mäta och kvantifiera metanemissionen från det aktuella objektet/ytan, här i termer av ppm. Operatören arbetar alltså i två steg, dels genom att översiktligt skanna ett område och dels genom att detektera metanemissionen och lägesbestämma läckagekällan. Operativt sett kan skanningmetoden karaktäriseras som en indikator metod, och pinpointning som en metod för att ge detaljerad information om lokaliseringen av en läckagekälla och bestämning av storheten på gasemissionen.

Med hjälp av infraröd teknik, typ FLIRs IR-GasFinder kan man dels detektera och visuellt bekräfta förekomst gasemission, och följa och studera gasmolnets spridningsförlopp och beteende relativt omgivande topografi, och väder- och utstrålningsförhållanden. Dock, som framgått av mätresultat redovisade ovan och iakttagelser redovisade i figur 12.6, i tabellerna 12.2, och 12.3 i bilaga 6, så varierar metanemission från ett och samma objekt/yta under samma mättillfälle, men även för samma objekt/ylor vid olika mättillfällen. Se vidare kapitel 18, Analys och utvärdering.

Nedan redovisas några exempel på variationer på gasemissioner registrerade med Siemens lasersystem, för samma objekt/ylor, under ≤ 1 minuts mättid, uppmätta inom Forsbacka F1-området, och där laser-data lagrats på PC. Figur 12.21 visar resultat från fältmätning av gasemissioner med Siemens lasersystem för mätobjekt F1-01, filnamn Forsbacka-F1-01-07_060919_01.xls, för år 2006, och figur 12.22 visar dito för samma mätobjekt för år 2007, filnamn Forsbacka_070301F1_01. Notera den stora inbördes variationen i metanemission uttryckt i ppm-värden registrerade under mindre än 1 minuts mätperiod för respektive mätserie, 2006 respektive 2007. Notera också den stora skillnaden i ppm-värden för samma mätobjekt registrerad under de två mätserierna 2006/2007.



Figur 12.21. Gasemissioner under ca > 1minuts mätserie, 10 mätvärden/sek registrerad med Siemens lasersystem, mätobjekt F1-01, filnamn Forsbacka-F1-01-07_060919_01.xls, år 2006.



Figur 12.22. Metanemissioner för samma mätobjekt som i figur 10.23, men för år 2007, filnamn Forsbacka_070301F1_01. ca 1,5 minuts mätserie, 10 mätvärden/sek.

12.4.3 Metanemissioner från släntkrön – mätning med laser och IR-teknik

Resultat från förstudien vid Filborna (avsnitt 6.3) indikerar att gasemissioner från släntkrön och släntfot är mer frekvent än för pallplan/överyta och slänt. Släntkrönet vid norra slänten, F3-området vid Forsbacka deponin har valts som exempel för att illustrera gasemissioner från släntkrön.

F3-området består av en de yttre vallarna av avfallscellerna i området. Pallplanen kan urskiljas då slänten inte är utjämnad. Fältmätning för kartläggning av gasemissioner från släntkrönet vid F3-området, Forsbackadeponin har utförts med Siemens lasersystem vid 10 olika mättillfällen för 12 olika läckageobjekt/ytor under 2006-2007. Kompletterande

fältnätningar har utförts med FLIR IR-GasFinder för detektering och visualisering av metanemissioner från utvalda objekt/ytor. Utöver mätning av gasemissioner från släntkrön för F3-området har även utförts mätning av metanavgång genom linjeskanning av hela norra slänten i horisontalled, samt kammarmetod-mätningar inom en slumpmässigt utvald, vertikalt orienterad rektangulär mätyta, se kapitel 14.

Fältnätning vid släntkrönet inom F3-området visar att det förekommer metanemissioner både från uppstickande föremål, typ järn- och plastdetaljer, från stenpartier, små sprickbildningar i ytskiktet på täckmaterialet, vid vegetationsfria ytor, och från ytor med samma typ av mossvegetation som redovisats för bl.a. Spillepengdeponin, Malmö (figur 12.14), Löt, Stockholm (figurerna 12.19 och 12.20), och för F1-området, Forsbackadeponin (figurerna 12.23 och 12.24).

Figur 12.23 visar en översikt över släntkrönet, F3-området, norra slänten, Forsbackadeponin. Pallkrönet vid F3-området har genomgående uppvisat stor variation i metanemissioner, från låga till mycket höga ppm-värden vid merparten fältnätningar, 100-15000 ppm. Undantag har varit vid mättillfällen med snabbt förändrade väder- och utstrålningsförhållanden, speciellt vid övergång från lågtryck till högtryck. Vid sådana tillfällen har ingen mätbar metanemission kunnat registreras med Siemens lasersystem.



Figur 12.23. Översiktsskildringar av pallkrön F3-området, Forsbackadeponin, från V=>Ö, respektive Ö=>V, med uppstickande föremål, vegetationsfria ytor och mossart med kort rotsystem som återfinns vid ytor med detekterbar metangas.

Figur 12.24 visar ett bildkollage med objekt/ytor med metanemissioner vid pallkrönet inom F3-området. Det långa uppstickande plaströret (bild f) har vid merparten mättillfällen resulterat i mätbara metanemissioner, även vid snabba väderomslag, då andra ytor och objekt visat ppm-data runt 0. Mätvärdena för plaströren har varierat från ≤ 100 ppm, mot maximalt 12000 ppm. För jämförande analys av mätdata från olika mättillfällen och år se tabell 12.4, bilaga 6.



a) ≥ 12000 ppm

b) ≥ 2000 ppm

c) 4000 ppm

d) 15000 ppm



e) ≥ 1000 ppm

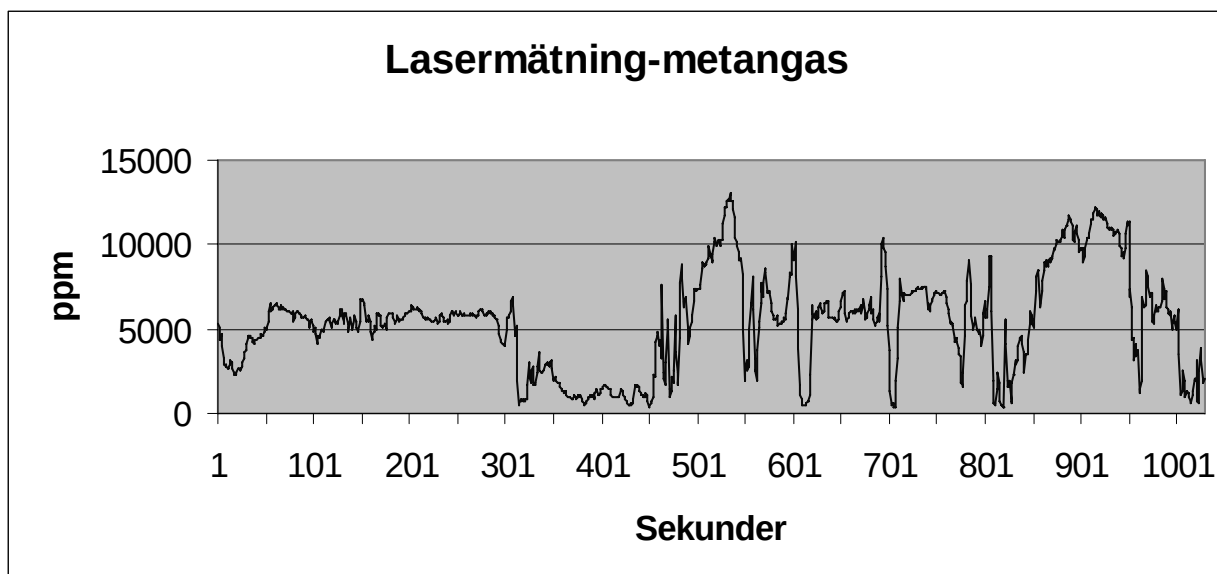
f) ≥ 12000 ppm

g) 4000 ppm

h) 4000 ppm

Figur 12.24. Bildkollage med objekt/ytor representativa som läckagekällor för metanemissioner vid släntkrönet inom F3-området.

I likhet med tidigare diagram över mätdata från lasermätning av metanemissioner visar diagrammet i figur 12.25 stora variationer i ppm-data över en mätperiod på ≤ 1 minut. Huruvida orsakerna i dessa variationer förorsakas av vindinducering, variationer i mikrotopografi, eller är förorsakat av metanprocessen nere i deponin, eller av en rad av varandra samverkande faktorer har inte kunnat klargöras inom projektet.



Figur 12.25. Diagram som visar variationer i mätdata vid fältmätning av gasemissioner från ett av mätobjekten (F3-01) vid pallkrönet, F3-området, Forsbackadeponin, 100-12000 ppm.

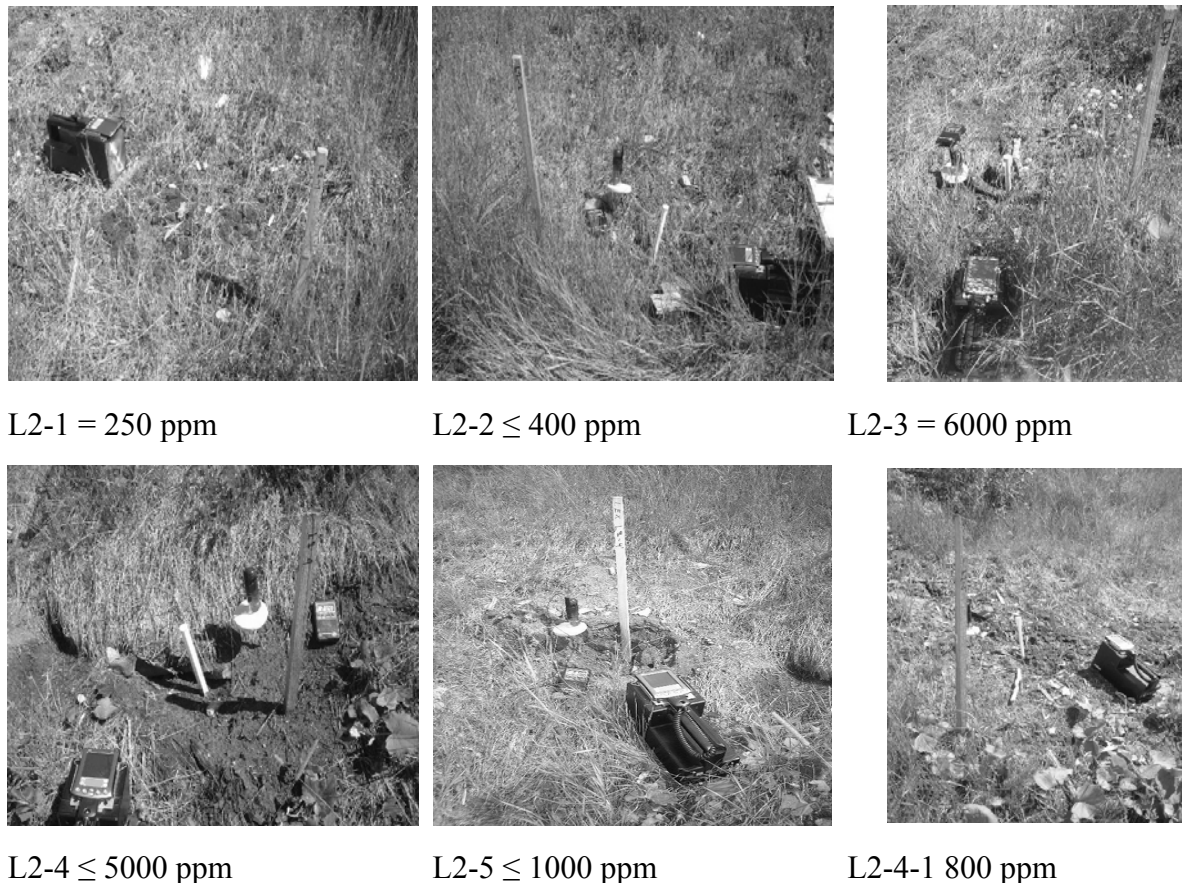
12.4.4 Metanemissioner från släntfot – mätning med laser och IR-teknik

Pallfoten vid västra slänten vid Löts deponi har valts för att illustrera metanemissioner från släntfot. Se skiss på västra slänten (figur 12.15). Nedersta släntfoten (Löt_L5_1-5) inkluderar 5 objekt/ytor med varierande metanemission, 800-2000 ppm, registrerade vid upprepade fältmätningar, 2006-2007. Släntfoten består av en ca 2 m hög vall, kort slänt + släntfot + en mindre plan yta och dränlager. Figur 12.26 visar en översikt av släntfot, L5_1-5, med en ca 10 cm sprickbildning i ytskiktet där metangas emitterat och förorsakat att gräsvegetationen dött. Jämför med den gröna frodiga gräsvegetationen ca 50 cm vardera sidan om sprickbildningen.



Figur 12.26. Översikt av nedersta släntfoten (Löt_L5_1-5), 800-2000 ppm, 2006-2007.

Figur 12.27. Bildkollage med ppm-data för respektive läckageobjekt/yta. Notera att i likhet med översiktsbilden (figur 10.28) är ytorna vegetationsfria eller har dött gräs vid partier med metanemission, L2-1-5. I samband med kammarmetodmätningar 2007 har tillkommit en ny yta, L2-4-1, som referensyta.



Figur 12.27. Löt bildkollage.

Det finns inga loggade ppm-data för släntfoten, L2-1-5, och några ppm-diagram kan därför inte presenteras. I tabell 12.5, bilaga 6 redovisas variationen i ppm-data för släntfot vid Lötdeponin L2-1-5, från fältmätningar med Siemens lasersystem 2006-2007.

12.5 **Metanemissioner för Högdaladeponin–sluttäckning enligt nya EU-normer**

Högdaladeponin är den enda deponin inom projektet som har sluttäckning enligt nya EU-normer (2001:512). Den är dessutom ett specialfall eftersom det också är den enda deponin i projektet där resultatet från fältmätning med Siemens laser system entydigt indikerar att en åtgärd, i det aktuella fallet att när man stänger av respektive sätter på funktionen hos en gasfackla, så ger åtgärden ett mätbart resultat i form av ökad respektive minskad metanemission från deponin. Resultatet indikerar den aktuella laserteknikens användbarhet för att kontrollera metanemissioner från deponier, av samma typ och täckningsförfarande som Högdaladeponin.

Enligt gällande EU-normer, och som överförts till "Förordning om deponering av avfall" (2001:512), skall sluttäckning ske för en deponi för icke-farligt avfall. Det tekniska kravet är att sluttäckningen skall vara så konstruerad att mängden lakvatten som passerar genom täckningen inte överskrider eller kan antas komma att överskrida 50 liter per kvadratmeter och år (§ 31). På grund av att det finns skyddsvärda objekt från vattenvårdssynpunkt nedströms deponin har det dock bestämts att täckningen skall vara bättre än det tekniska kravet 10 l/m² och år. Sluttäckningen består av ytavjämning, tätlager av bentonitmata, drän-skikt av glaskross, samt mer än 1 m täckjordar och vegetationsjord.

Högdaladeponin har medtagits i ett senare skede av projektet på förslag från deltagarna vid ett referensgruppsmöte. Fältmätningarna vid Högdaladeponin har begränsats till ett fåtal momentana mätningar utförda under mätperioden, 2007-07-06–2007-11-28. Vid första mättillfället var gasturbinen för förbränning av metangas ur funktion. Vid tre därpå följande mättillfällen var gasfacklan i funktion, för att vid ett femte mättillfälle vara avstängd för mätning och studie av hur och om metanemissioner genom deponiytan påverkas under förhållanden med gasturbinen i funktion respektive ur funktion.

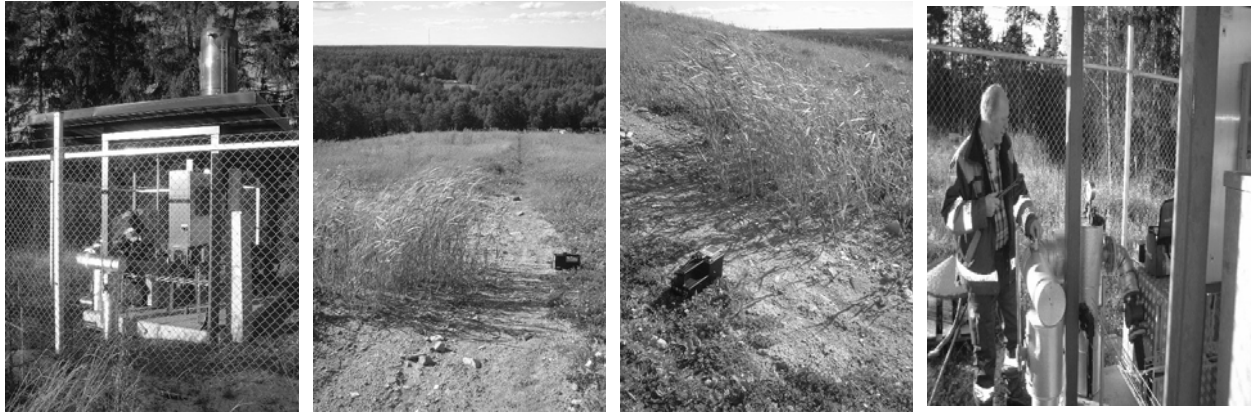
Resultaten från utförda fältmätningar vid Högdaladeponin är att betrakta som preliminära och ytterliga kompletterande mätningar bör utföras med gasfacklan i och ur funktion, under olika väder- och utstrålningsförhållanden. Vindhastigheten är härvidlag den viktigaste väderparametern eftersom Högdaladeponin p.g.a. sin storlek, geometriska form och lokalisering är exponerad för vind. Även initialt relativt låg vindhastighet ökar när vinden forceras upp utmed de höga och tvärt branta slänterna vilket medför att vindhastigheten normalt är högre på platån/överytan än vid släntfot.



Figur 12.28. Flygbild över Högdaladeponin.

Fältnätning har utförts dels under säsong med kraftig vegetation på slänterna samt under perioder med gles vegetation och vegetationsfria ytor på platån/överytan (2007-07-06/07-20), och dels under mätperioder med vinterförhållanden, minusgrader och lätt snötäcke (2007-11-15/27/28).

Figur 12.29 (a) visar gasuttagssystem med fackla för deponigasförbränning vid Högdaladeponin, (b) visar delyta med gasemissioner vid stig med vassdunge, västra slänten, 1500-2000 ppm, med gasfacklan ur funktion, (c) detaljbild av samma parti som (b), bild (c) gasfacklan tas ur drift för jämförande mätning av metanemissioner med och utan fackling. Vid mättillfället med gasfacklan ur funktion uppmättes upp till 2000 ppm vid vasspartiet i västra slänten vid detaljerad lasermätning, och ≤ 1000 ppm x m från sprickbildning vid platån/överytan, och 100-400 ppm x m generellt för V, N, Ö, och S:a slänten, vid skanning. Vid upprepade mätning med gasfacklan i drift kunde inga mätbara metanemissioner registreras för partiet med vassdunge, västra slänten, platån och slänterna gav 50-100 ppm x m. Resultaten från dessa två jämförande mätningar indikerar att när gasfacklan är ur funktion så transmitteras gasen genom deponimassorna och emitterar genom ytskiktet på deponin, och när gasfacklan är i funktion så emitteras bara något över normal bakgrundsemission från Högdaladeponin. Observera, att slutsatserna gäller under då rådande mätförhållanden.



a) Fackla och fläkt b-c) Västra slänten 1500-2000 ppm läckage d) Gasfackla tas ur drift

Figur 12.29. System med fackla vid vassrugg, gasfacklan ur funktion.

Orsaken till att vassdungen utgjorde en så pass tydlig läckagekälla är att de grova vasstråna i likhet med grova grässtrån genom snötäcke påverkas av vindrörelser och öppnar upp kanaler i ytskiktet där metangasen kan emittera, se vidare avsnitt 10.5.

Väder- och utstrålningsförhållanden vid fältmätning vid Högdaladeponin 07-11-15, 10⁰⁰

T_s -50 °C

T_l -4 °C

SW i lä = **1 m/s**, på **platån = 3-4 m/s**

Lufttryck 1016 mb

Glest snötäcke med genombrytning av vegetation.

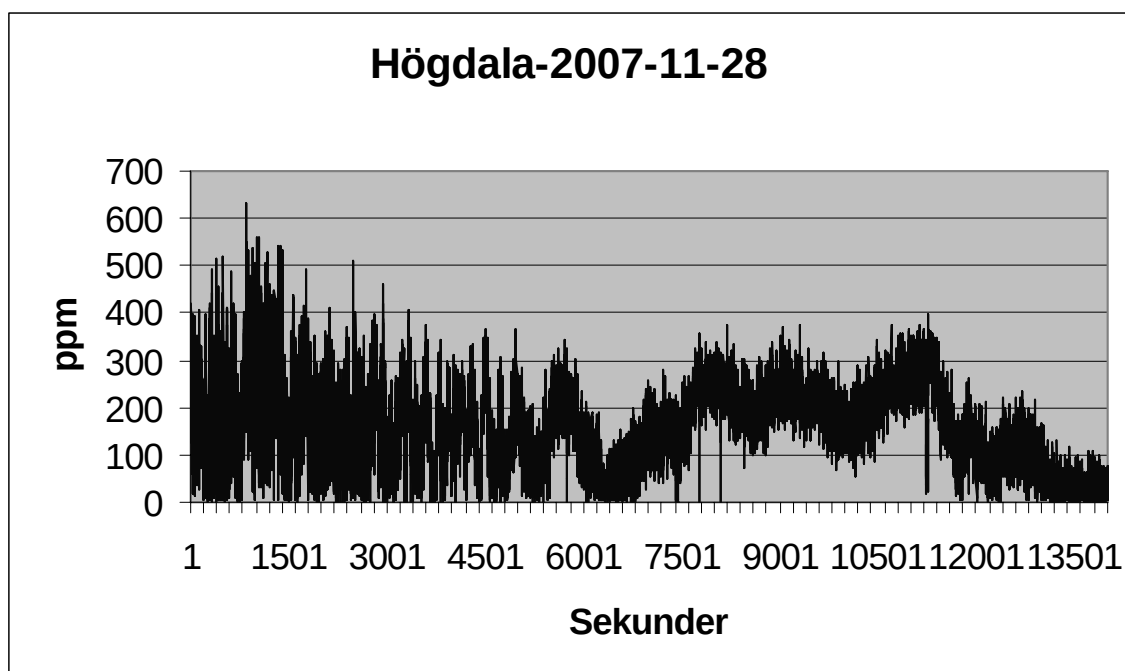
Hård frusen markyta.

Kontinuerligt flöde av metangas, speciellt från S:a slänten. Mätning med lasern placerad på platån i riktning mot S:a slänten = 100-400 ppm x m. Mätning i riktning mot V:a slänten = 150-300 ppm x m, se vidare sammanfattning på mätdata i tabell 12.6, bilaga 6.



Figur 12.30. Högdaladeponin, laser- väderstation och loggersystem placerad uppe på platån, med lasern riktad utmed platån i SO-riktning, Högdala, 0-500 ppm x m.

Loggermätning av metanemissioner och väder- och utstrålningsförhållanden har utförts vid ett mättillfälle, 2007-11-28, med gasfacklan avstängd. Lasersystemet, utrustningen för samtidig mätning av väder- och utstrålningsförhållanden, samt loggersystemet var placerat på ca 30 cm höjd från markytan på platån/överytan (figur 12.30). Strålgångens längd är ca 30 m. Diagrammet på metanemissioner i figur 12.31 visar förhöjda emissionsvärden från Högdaladeponin då gasfacklan var avstängd. Någon jämförande loggermätning har inte utförts under förhållanden med gasfacklan i funktion, men väl momentana fältmätningar, se tabellen, bilaga 12.6.



Figur 12.31. Diagram som visar metanemissioner då gasfacklan är avstängd.

12.6 Metanemissioner vid vinterförhållanden med snötäcke

Merparten fältmätningar med Siemens lasersystem och FLIRs IR-GasFinder har utförts under barmarksförhållanden även under vintersäsong med undantag för deponierna Hagby och Löt i Stockholmsregionen, och Forsbackadeponin i Gävle-regionen som p.g.a. sitt nordliga läge tidvis har ett tjockt snötäcke vintertid. Fältmätning med Siemens lasersystem har skett under alla årstider för alla deponier. Kartläggning av metanemissioner för de sydligaste lokaliserade deponierna, Spillepeng i Malmö, och Filborna i Helsingborg har utförts under vinterförhållanden med låg temperatur och utan snötäcke.

Redovisningen nedan begränsas till ett urval fältmätningar utförd vid Hagby och Löt för att illustrera hur man med fjärranalys, typ Siemens lasersystem och FLIRs IR-GasFinder system kan detektera och kartlägga metanemissioner från avfallsupplag under vintertid med snötäcke.

Fältlaborativa experiment med kontrollerad simulering av metanemission från gasrör lokaliserade under ett 20-50 cm tjockt av lager snö har utförts inom ramen för det refererade VOGUE-projektet. Resultat från dessa experiment indikerar att snö fungerar som effektiv isolermatta som förhindrar eller minskar metanemissionen/distributionen från markytan. Men

resultatet visar också att gasen söker den lättaste vägen ut genom det isolerande och hindrande snötäcket. Vid tillfällen då ytskiktet frusit till skare så förhindras gasen att emittera genom snöytan, trycket ökar under ytan och ett deponigastryck byggs upp. Till slut har trycket ökat så mycket att metangasen bryter sig igenom och emitterar genom ytskiktet på snötäcket, eller söker sig ut i kanterna av snötäcket, eller genom kanaler som byggts upp av höga, styva grässtrå eller annan hög undervegetation som når upp ovan snötäcke och vars rörelser påverkas av vinden, illustrerat i bl.a. figur 12.36.

Fältmätningar med fjärranalysteknik, typ Siemens lasersystem och FLIRs IR-GasFinder, vid Hagbydeponin (cell 89) bekräftar resultatet om hur metangas beter sig under vinterförhållanden med snötäcke, indikerat i VOGUE-projektet. Resultatet bekräftar också påståendet att det är möjligt att detektera och visualisera metanemissioner från snötäckta avfallsdeponier under svåra vinterförhållanden med låg temperatur och mycket snö.

Figur 12.32 visar en snötäckt deponiyta vid cell 89, Hagby, där fältmätning under höstperioden dokumenterade metanemissioner visas från lägesbestämda objekt/ytor (h9, h10, h11, h12) med ppm-värden som varierade från 1000-3000 ppm. Vid upprepad fältmätning under snöförhållanden kunde ingen metanemission detekteras med lasersystemet vid de lägesbestämda objekt/ytor där det tidigare dokumenterats mätbara metanemissioner. En av stakkäpparna drogs upp vilket resulterade i att metangas strömmade ut genom hålet från stakkäppen. När stakkäppen sattes tillbaka i samma hål upphörde gasflödet. Det noterades att ytskiktet på snölagret hade ett tunt men hårt lager av skare. Genom skanning av det aktuella området kunde konstateras att metangas läckte ut vid anslutningar mellan långa hårda grässtrån och snöytan. Vinden satte grässtråna i rörelse vilket öppnade upp kanaler genom snölagret från deponiytan upp till snöytan. Mätytan omfattade 10-15 m² inkluderande de tidigare lägesbestämda objekten/ytorna markerad med stakkäppar. Metanemissionen från de nya snötäckta mätobjekten uppmättes till $\geq 1000\text{-}3000$ ppm, dvs. liknande mätresultat som vid fältmätningen under hösten. Fältmätningen under vinterförhållanden, Hagby, cell 89, utfördes 2007-01-29, 15⁰⁰-17⁰⁰, vid en lufttemperatur på -5 °C, NV vind, 1 m/s, molnfri himmel, med ett 20-30 cm snötäcke.



Figur 12.32. Energicell 89, Hagby. Metanemissioner via kanaler som uppstått genom att vinden satt långa styva grässtrån i rörelse, 1000-3000 ppm, registrerat med Siemens lasersystem. Snötäcke, 2-3 dm.

Slutsatser; Ett snölager fungerar som ett lock som förhindra metangasen att emittera ut genom tidigare lägesbestämda läckage källor. Ett ökat tryck byggs upp under snötäcket och metangasen söker sig till rotsystemen hos tjocka grässtrån. Vinden ovanför snöytan sätter de tjocka och styva grässtråna i rörelse och kanaler byggs upp som ger gasen fri passage genom och runt grässtråna från deponiytan upp till ytskiktet på snötäcket. Liknande slutsatser gäller också för buskvegetation etc. som når upp genom ett snötäcke.

Det redovisade exemplet (figur 12.32) illustrerar ett fall med ett snötäcke med skare. Nästa exempel (figur 12.33) illustrerar ett tillstånd med djup porös snö där metangasen har fri passage att emittera genom snötäcket upp till ytan.

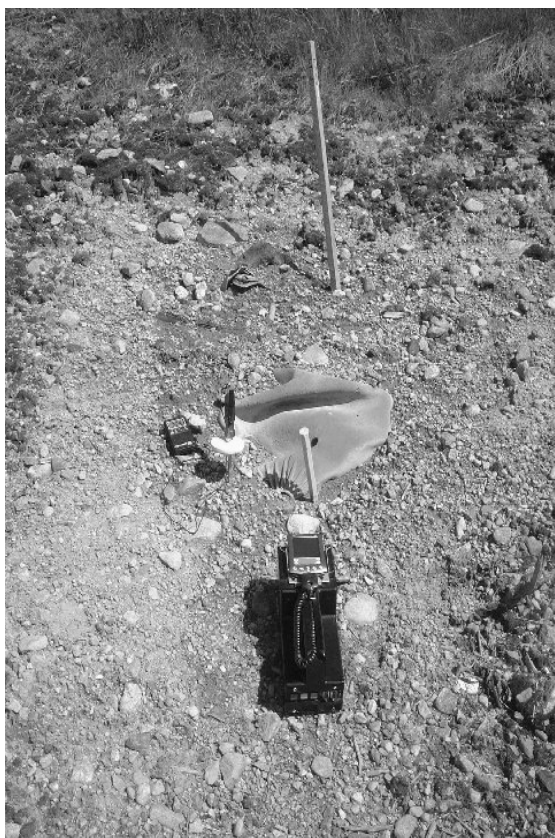
Figur 12.33 a) visar en översikt av slänten L1-6 – L1-1, (b) detaljbild från L1-3) som visar exempel gasemission genom ett snötäcke utan grässtrån eller annan uppstickande vegetation, och där inget visuellt tecken på förekomst av gasemission kunde registreras. Fältmätning med Siemens lasersystem och FLIRs IR-GasFinder utfördes vid Lötdeponin 2007-01-30, 15⁰⁰-17⁰⁰, vid en lufttemperatur som varierade mellan -2 - -5 °C, NV vind, 1 m/s, molnfri himmel, 20-30 cm snödjup. Mätning med lasersystemet gav ett ppm-värde ≥ 5000 ppm, vilket skall jämföras tidigare uppmätta ≥ 6000 ppm vid fältmätning för samma objekt (L1-3) under barmarksförhållanden, 2007-09-19, se figur 12.17 avsnitt 12, Löt västra slänten.

Den specifika delen av västra slänten, Löt, L1_1-8 inkluderar 8 objekt/ytor med metanemissioner som varierar från 500 $\geq$ 5000 ppm, vid snötäckt yta. I jämförelse med fältmätningarna av snötäckta objekt/ytor vid Hagbydeponin, redovisad i figur 12.32, så kunde metanemissioner detekteras från alla lägesbestämda objekt/ytor vid Lötdeponin såväl under vinterförhållanden med snö som under snöfria/barmarksförhållanden. Notera att det inte fanns någon skare på ytskiktet vid mättillfället för fältmätningarna vid Löt, västra slänten. Förekomst av skare skulle även här kunna medföra att metangas inte kunde penetrera och emittera genom ytskiktet på snötäcket och förmodligen skulle då heller inte några mätbara metanemissioner kunnat detekteras, speciellt som här inte fanns någon vegetation som kunde bilda kanaler genom snötäcket upp till ytskiktet.

Mätobjekt L-3 består av ett plastobjekt som sticker upp från deponiytan som leder och emitterar metangas under såväl barmarksförhållanden som vid snötäckt yta. Hur stort eller hur djupt plastobjektet sticker ner i deponin är inte känt. Däremot kan konstateras att metangas leds utmed kanterna på plasten och ger upphov till metanemissioner detekterbara med såväl Siemens lasersystem som FLIRs IR GasFinder. Löt, västra slänten representerar en slänt med många läckage med relativt omfattande gasemissioner. Vid västlig och nordvästlig vind konstateras gaslukt och kan uppmätas 200-400 ppm luftburna emissioner på närliggande plattor, och vid S:a och N:a slänterna.



Figur 12.33. a) Översiktbild över objekt L1-6 – L1-1, västra slänten, Lötdeponin. b) Objekt L1-3, gasläckage genom orört poröst snötäcke (20-30 cm), $\geq$ 5000 ppm.



c) L1-03, plastobjekt ≥ 6000 ppm, samma objekt som (b) men under barmarksförhållanden

12.7 *Metanemissioner från lakvattensystem och gasuttagssystem*

Av litteraturen inom deponiområdet framgår att metanemissioner från gasuttagssystem och lakvattensystem kan vara omfattande genom att ledningssystemen för gasdistribution och lakvattendistribution kan fungera som transportleder för metangas (Chanton et al., 2007, Scheutz et al., 2007). Liknande iakttagelser har gjorts inom projektet där mätning av både ledningssystem, gasbrunnar, lakvattenbrunnar och lakvattendammar indikerar förekomst av metanemissioner, varav en del relativt kraftfulla indikationer från vissa objekt. Nedan redovisas ett urval objekt för att illustrera fjärranalysteknikens användbarhet och begränsningar för statusbestämning av ledningsbundna system för distribution av gas och lakvatten.

12.7.1 Metanemissioner från lakvattensystem

Konstruktion och funktion hos lakvattenuppsamlingssystem varierar för de olika deponierna i projektet. Här redovisas ett urval exempel på lakvattensystem som vi haft möjlighet att genomföra fältmätningar på med Laser och IR-system för detektering av metangas, och som bidrar med resultat av generellt intresse för projektet, som t.ex. Forsbacka lakvattensystem och delar av Hagby- och Lötdeponiernas lakvattensystem.

Forsbacka har ett lakvattensystem där orenat lakvatten från deponin leds via ett rörsystem till en lakvattenbrunn (LAK 1) och pumpas därifrån vidare till en luftad lakvattendamm (LD1)

som utgör 1:a reningssteget. Lakvattnet leds därifrån vidare till en markbädd med sandfilter (PP4, steg 2), anslutet till en utjämningsdamm. Från reningssteg 2 leds det renade lakvattnet till en våtmark med delvis öppet vatten, reningssteg 3, för att därefter släppas ut genom ett utlopp till ett öppet dike (PP6). Fältmätning med laser indikerar högre metanemissioner från slutsteget (PP5) i reningsprocessen 200-800 ppm x m jämfört med 50-200 ppm x m i det första reningssteget, luftad lakvattendamm, LD1. Lakvattnet vid utloppet (PP5) borde uppvisa betydligt lägre ppm-värden än lakvattendammen med orenat lakvatten (LD1). För mer detaljerade mätdata, se tabell 12.7, bilaga 6. Figur 12.34 visar (a) lakvattendammen LD1 med orenat lakvatten, och (b) slutsteget PP5 som skall ha renat vatten.



Figur 12.34. **(a)** LD1, första reningssteget av lakvatten, Forsbacka, 50-200 ppm x m



(b) PP5, sista reningssteget, 200-800 ppm x m

Mätresultaten från fältmätning av metanemissioner från lakvattendammar vid Forsbacka-deponin kan inte användas för att dra generella slutsatser om metanemission från lakvattendammar eftersom man inte kan utesluta mätfel genom vindburna emissionsbidrag från andra närliggande emissionskällor. Dessutom mätningar av metanemissioner lakvattendammar bör göras med reflektorytor som backskatteryta vilket medger att man kan räkna om ppm x m-data till ppm-data och korrigera beräkna nettobidraget av metanemissionen från den aktuella lakvattendammen. Lasermätning mot reflektorytor har introducerats först efter merparten fältmätningar utförts i projektet. Resultat från upprepade momentana lasermätningar och långtidsmätningar med laserdata lagrade på logger för lakvattendammen LD 1 och för andra lakvattensystem inom projektet (Hagby, Löt, Filborna) indikerar dock att lakvattensystem med öppna dammar, öppna lakvattendräner, etc. avger ett konstant och kontinuerligt flöde av metangas till atmosfären, oberoende av syrehalten i vattnet, väder- och utstrålningsförhållanden. Kompletterande fältmätningar bör utföras för att klargöra metanemissionsbidraget från lakvattendammar. Värt att notera är dock att lakvattensystem består av mer än lakvatterdammar, utan även av öppna och slutna distributionssystem och lakvattenbrunnar som kan emittera metangas, se bl.a. redovisningen nedan.

Hagby. Ett exempel på emissioner på lakvattensystem är det öppna systemet för insamling av lakvatten som finns vid Hagbydeponin, relaterad till Cell 89 och Cell 90. Lakvattnet pumpas här till en damm för behandling/rening av lakvatten lokaliserad på toppen av deponin och

transporteras därefter utmed deponislänten i en öppen stenkanal till nästa reningssteg, figur 12.35. I slutet av den öppna stenkanalen finns vanligtvis ett stort stenmagasin från vilket vattnet vidarebefordras till en lakvattendamm. Syfte med den öppna stenkanalen är att lakvattnet skall bli syresatt i likhet med det mekaniska luftningssystemet vid t.ex. lakvattensystemet, LD1 etc., Forsbackadeponin (figur 12.34).

Resultat från upprepade laser- och IR-mätningar under liknande mätbetingelser, väder- och utstrålningsförhållanden indikerar att öppna stenkanaler och speciellt infiltrationsmagasin av sten, liknande konstruktionen vid Hagbydeponin, resulterar i kontinuerliga och relativt höga gasemissioner till atmosfären under alla årstider, motsvarande 2000-8000 ppm.



Figur 12.35. (a). Lakvatten-stenkanal med infiltrationsmagasin av sten, metanemission sommartid=>vintertid, 2000-8000 ppm



b) samma objekt, vintertid



Figur 12.35 (c). Översiktsbild, vintertid, på samma objekt som i figur 12.36 (a-b).

Figur 12.36 (a-b) visar värmebilder från IR-GasFinder registrering av samma objekt som i figur 12.35 a-c, vintertid. Bildparet (a-c) visar dels en förhöjd strålningstemperatur och ett avvikande strålningstemperaturmönster från stenarna i stenkistan som en sekundär effekt av emission av metangas genom stenkistan i det öppna lakvattendränaget. Dels kan urskiljas ett sammanhängande ljust, svagt avvikande gråtonsmönster från mitten och ner mot datumtexten i bilden, som indikerar förekomst av ett gasmoln. Den högra värmebilden (bild b) är en inverterad gråtonsbild. Bildparet är selekterade från en videosekvens. I videofilmen visualiseras gasemissionen tydligt som ett pulserande gasmoln som flyter ut utmed deponiytan.



Figur 12.36. (a-b) visar värmebilder från registrering vintertid med IR-GasFinder systemet för samma objekt, lakvattenstenkistan, som i figur 12.35 (a-c), vintertid. Ett gasmoln kan svagt urskiljas genom det ljusgrå avvikande respektive mörkgrå avvikande strålningstemperaturmönstret i värmebilderna, bild (a) respektive bild (b). Videofilmen från vilken bilderna är hämtade visualiserar emission av ett tydligt gasmoln från stenkistan.

12.7.2 Gasemission från gasuttagssystem

Tillståndet hos gasuttagssystemen varierar mellan de olika deponierna i projektet och kan också variera lokalt inom respektive deponi. Figuren 12.37 and 12.38, illustrerar delar av ett gasuttagssystem där både Siemens lasersystem och FLIRs IR-GasFinder har indikerat förekomst av stora gasemissioner jämförbara med de gasflöden som simulerats inom det tidigare redovisade VOGUE-projektet, här med en spännvidd på 5000-20000 ppm, i huvudsak från gasbrunnar. Liknande resultat har dokumenterats från fältmätningar utförda vid de två franska deponierna inom projektet.



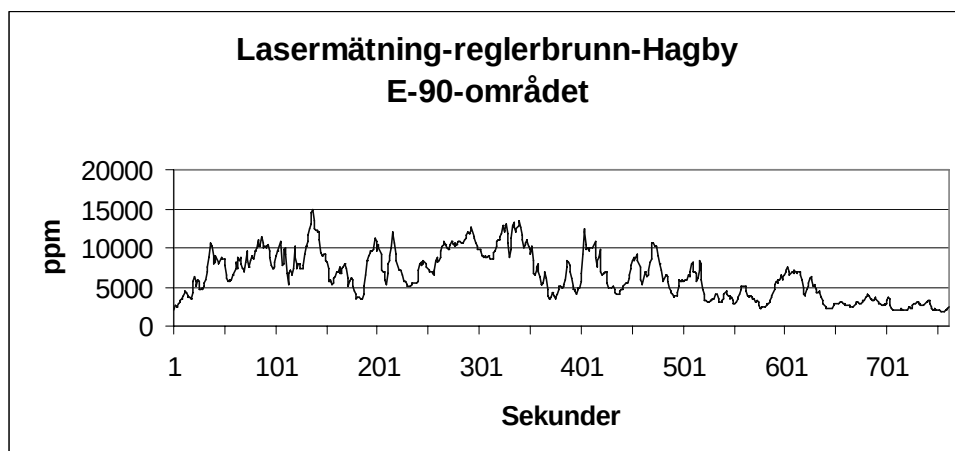
Figur 12.37. Gas-reglerbrunn, Hagby, sommarförhållanden, 6000-10000 ppm



Figur 12.38. Gas-reglerbrunn, Hagby, vinterförhållanden, 6000-10000 ppm.

Lasermätning

Figur 12.39 visar en gaskoncentrationsprofil med mätdata från fältmätning utförd med Siemens lasersystem. Notera den stora variationen i mätdata över mätsekvensen (2000-15 000 ppm x m). Mätningen har utförts på ett avstånd mellan lasersystemet och läckagekällan på ca 5 m. Liknande variationer återfinns för merparten kort- och långtidsmätningar utförda för olika typer av gasreglerbrunnar inom projektet.



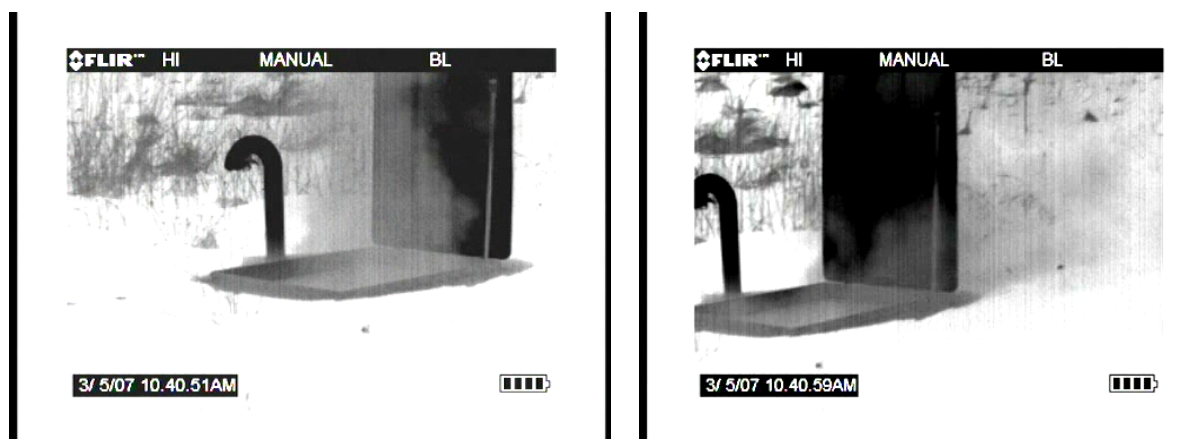
Figur 12.39. Gaskoncentrationsprofil för gasreglerbrunn lokaliserad På E-90 området Hagbydeponin (2000-15000 ppm), Hagby_060912_02.

Mätning med IR-GasFinder-system

FLIRs IR-GasFinder är ett kompletterande hjälpmedel för att detektera och visuellt bilda sig en uppfattning om gasläckagets omfattning och spridningsbild vid gasemissioner från gasuttagssystem. Som framgår av resultaten från mätningarna av simulerade kontrollerbara gasläckage vid gasövningsplatsen BARBARA, Malmö Brandkår så är det svårt att presentera gasrelaterade IR-data så att det ger en rättvisande bild av GasFinder systemet informationspotential och dynamik i värmebildsdata, avsnitt 12. Vad gäller gasemission från gasuttagssystem och lakvattensystem så har det varit möjligt att fånga in och frysa gasplymen i en stillbild från videofilmen och framställa en IR-bild som visar gasemissionen vid en specifik mättidpunkt, användbar för att indikera informationsinnehållet i värmebildsdata.

Analys av gasemissionen utifrån en digital IR-videofilm är dock att rekommendera om man vill visualisera metanemissionen och studera metangasens spridningsbild.

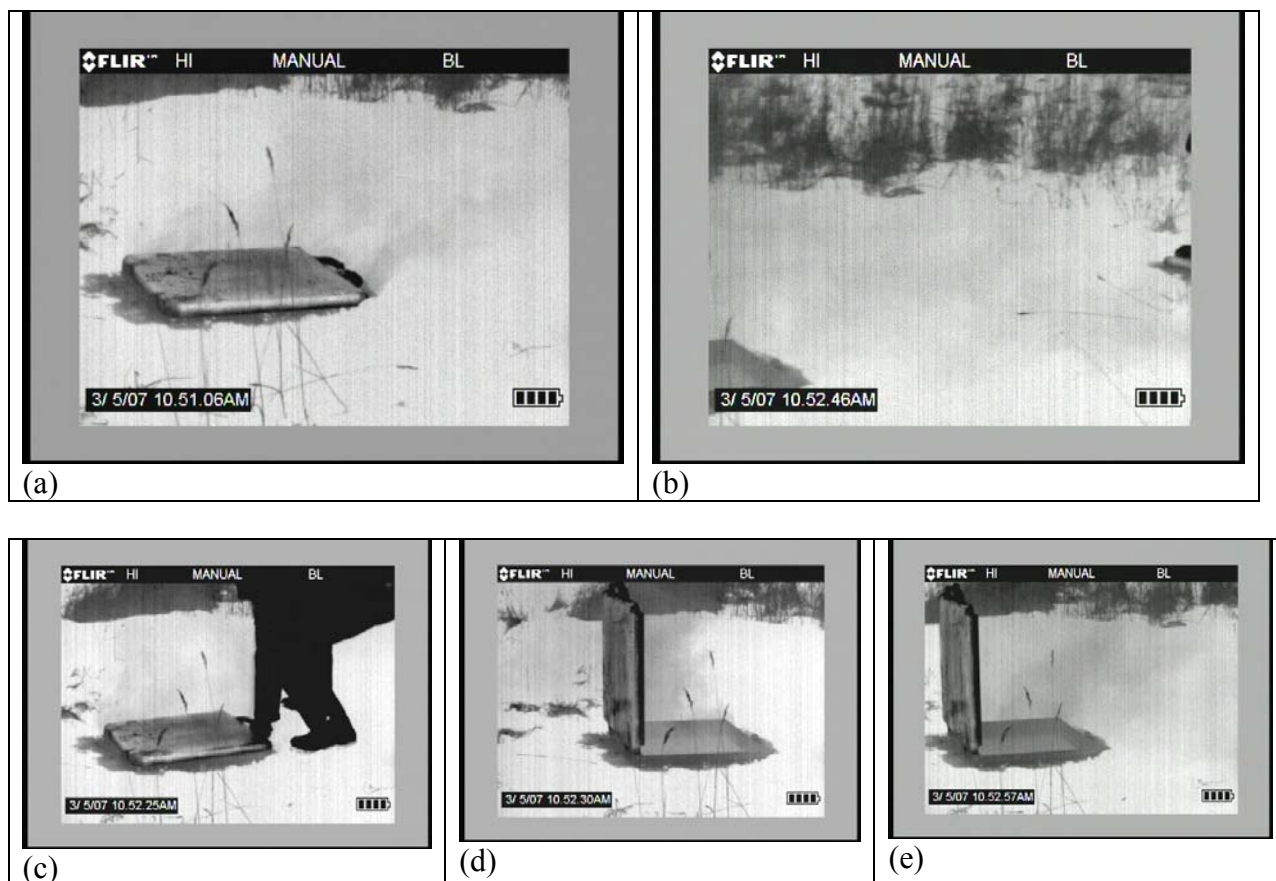
Figur 12.40 visar ett urval av två värmebilder ur en serie värmebilder som illustrerar olika spridningsförlopp hos en fryst gasplym och som bekräftar förekomst av gasläckage från den gasreglerbrunn, som visas i figur 12.37, ovan. Vänstra värmebilden visar en uppåtgående ström av metangas i form av en ljusgrå gasplym, och högra värmebilden visar samma objekt med en horisontalt utgående gasplym som avtecknar sig som ett sammanhållande ljusgrått gasmoln mot den ljusa snön. Båda värmebilderna är uttagna från en IR-GasFinder videosekvens. Den vänstra bilden är tagen ca 1 minut efter att locket till gasbrunnen öppnats, och den högra ca 2 minuter efter att brunnslocket öppnats. Den kraftigt uppåtgående gasströmmen i den vänstra bilden är förorsakad av läckande metangas från gasrören i brunnen som ger förhöjd metankoncentrationen som får fri passage till atmosfären först när locket öppnas. Högra värmebilden visar en horisontell strömning av metangas från samma objekt ca 2 minuter efter att brunnslocket öppnats, förorsakad av temperaturskillnad mellan metangasen (+3,7 °C) och omgivande luft (0 °C), s.k. naturlig konvektion, 2000-15000 ppm vid lasermätning.



Figur 12.40. Två frysta värmebilder från en IR-GasFinder videosekvens av gasemission från en gasreglerbrunn vid Cell E90, Hagby, korresponderande till figur 12.37.

Liknande beteende hos metanemissioner från gasuttagssystem illustreras i figur 12.41 från ytterligare en gasreglerbrunn vid Hagbydeponin. Värmebild (a) visar metanläckage från reglerbrunn med brunnslocket stängt och värmebild (b) visar hur gasmolnet som bildats vid brunnslocket driver iväg från gasbrunnen och omblandas med omgivande luft. Värmebild (c) och (d) visar gasemissioner från samma gasreglerbrunn med brunnslocket stängt (c) respektive öppnat (d). I likhet med värmebilderna i figur 12.40 så visar värmebild (d) en vertikal strömning av metangas från ca 2 minuter efter att brunnslocket öppnats, förorsakad av temperaturskillnader mellan metangasen (+2,8 °C) och omgivande luft (0 °C), s.k. naturlig konvektion. Allteftersom metankoncentrationen minskar i gasbrunnen kommer gasen att emittera genom naturlig konvektion i vertikal strömning, värmebild (e), 9000-10000 ppm vid lasermätning.

Värmebilderna i figur 12.40. illustrerar i likhet med figur 12.41 a-e informationspotentialen hos IR-GasFinder teknologi för att detektera och visualisera gasemissioner från gasuttagssystem. Observera, att värmebildsdata analyserade som kontinuerliga bilder i en videosekvens ger en betydligt kraftfullare och mer dynamisk information om metangasens rörelser och spridningsmönster än frysta värmebilder i ett skriftligt dokument.



Figur 12.41. Kollage av värmebilder från en IR-Gasfinder videosekvens registrerade vid Cell E90, Hagby deponin.

Presentation av gasrelaterade IR-data i en skriftlig rapport är svår att göra på ett sätt som illustrerar GasFinder systemets informationspotential och som framställer dynamiken i värmebildsdata. Ett sätt att presentera IR-data i ett skriftligt dokument är att ur den digitala videofilmen fånga in och frysa den bildsekvens som bäst avbildar gasplymen för ett läckageobjekt vid en specifik mättidpunkt. Informationspotentialen hos gasrelaterade IR-data redovisas dock bäst genom studier av videofilmen presenterad i en elektronisk rapport.

12.8 Detektering av metanemissioner från deponi utan deponigasuttag

Änglarps avfallsanläggning har en deponi där avfall deponerats från 1968. Tillförseln av avfall är sedan 2002 mycket liten jämfört med tillförseln under 1990-talet då ca 12000 ton avfall tillfördes årligen. Stora mängder slam har tillförts som i deponin samlats i laguner. Alla laguner utom en sista är täckt. Det deponerade avfallet ligger i två deponidelar. Den äldre av dessa är täckt, men har ej sluttäckts. Den nyare delen är inte täckt i alla delar.

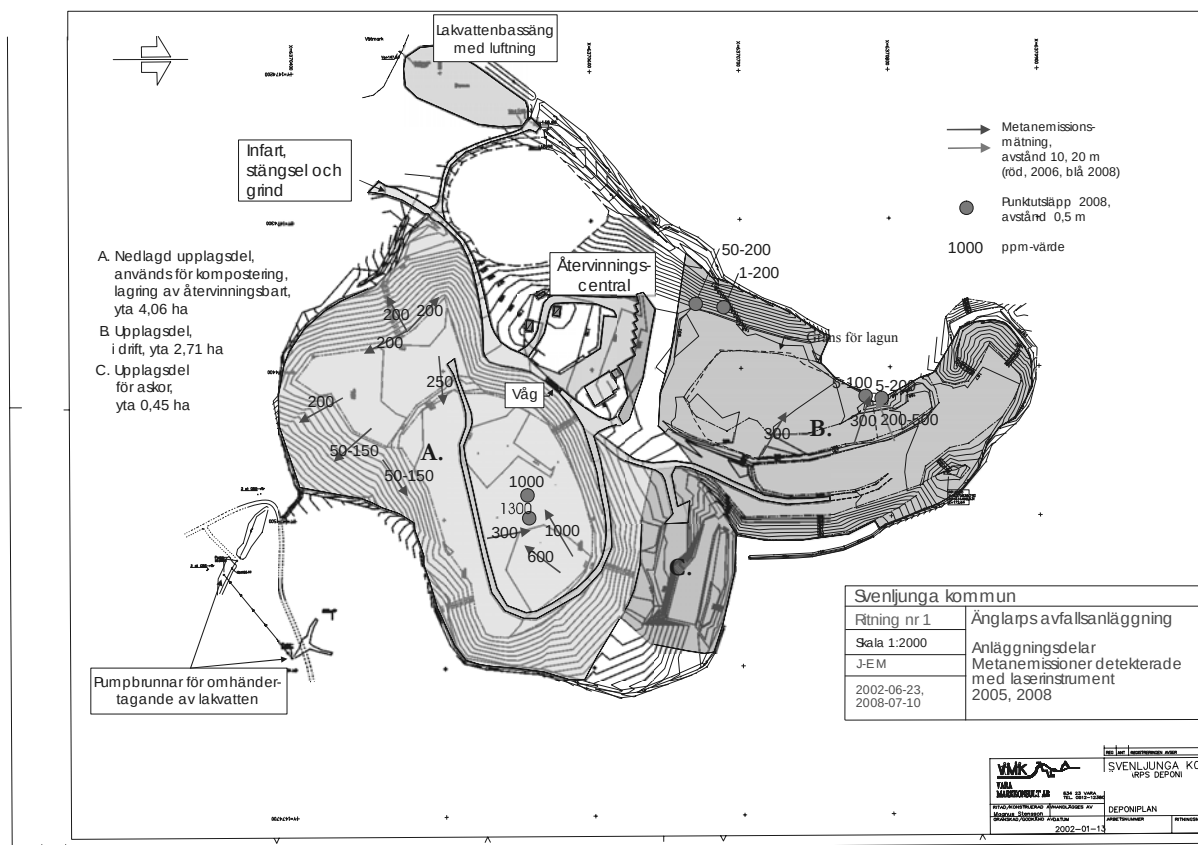
Deponidelarna saknar gasuppsamling. Bildad deponigas avgår därför till atmosfären utom del del av bildad metan som kan oxideras i deponiernas ytskikt.

Deponierna har undersökts vid två tillfällen; december 2006 och juni 2008. Resultat från mätningarna visas i figur 12.42. Vid mätningen 2006 dekteades inte några punktutsläpp, men

metan detekterades i luften ovanför deponin på flera platser. Det var svårt att lokalisera utsläppen då vinden förde metan från framför allt den öppna lagunen. Över denna kunde metanläckage konstateras.

På sommaren var metanhalten i luften ovanför deponin betydligt lägre, och metan kunde bara påträffas i punktläckage på en del av den äldre deponin som saknar vegetationsskikt, samt i slänter tillhörande den nyare deponin. Ovan den kala ytan på den gamla delen kunde en halt av ca 5 ppm mätas upp, i övrigt var det låga halter. Detta skall jämföras med de 5-10 ppm som på flera platser uppmättes 2006.

Mätningarna tyder framför allt på att metanoxidationen är betydande på sommaren, och utsläppen från delar med vegetationsskikt blir då liten. De metanhalter som uppmättes 2008 fanns ovan en grusad kal yta inom den äldre deponidelen. Den lagun som 2006 hade ett läckage av metan uppvisade 2008 inga förhöjda halter, nedbrytningen av slammet var tydligen nu på en lägre nivå, då något nytt slam har ej tillförts sedan 2005.

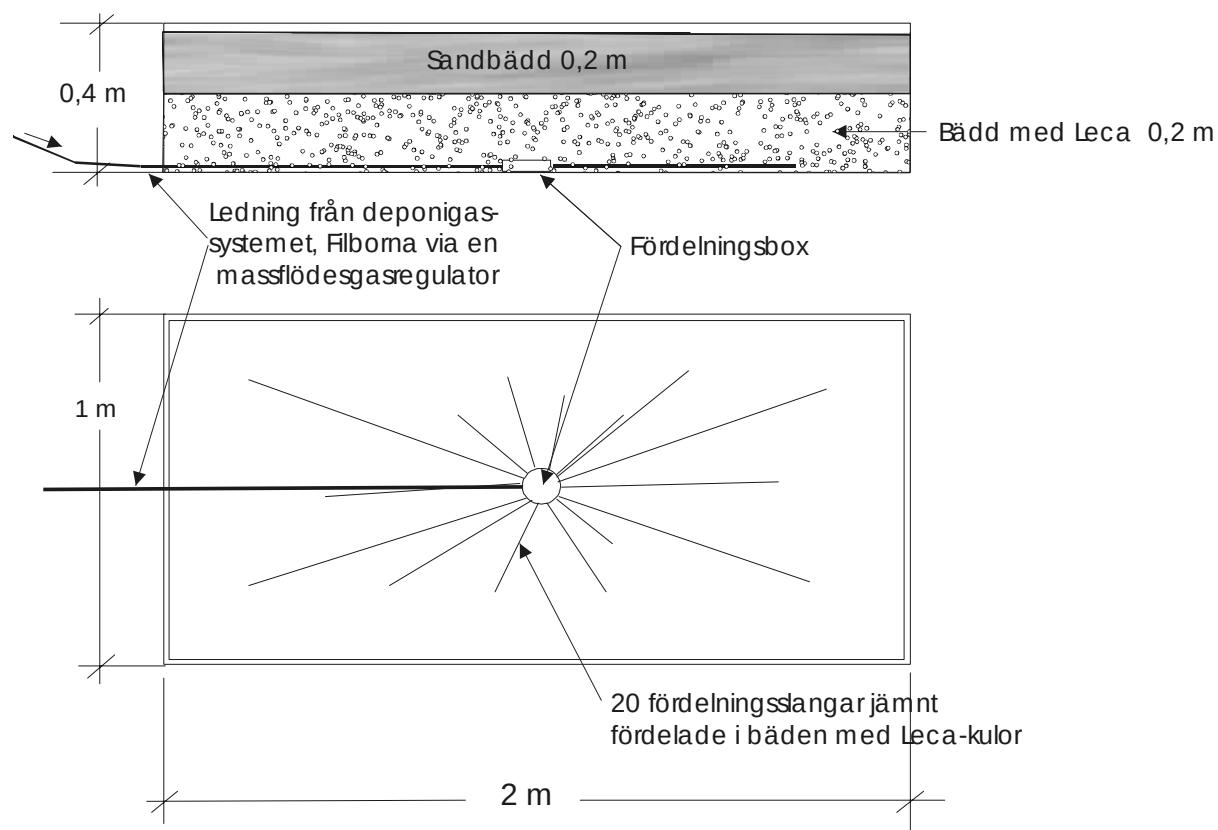


Figur 12.42. Resultat av mätningar med laserinstrumentet 2006 och 2008 vid Änglarps avfallsanläggning.

13 MÄTNINGAR MED LASERINSTRUMENT OCH KAMMARMETOD

13.1 Kammarmetod och koncentrationsmätning med laserinstrument, kontrollerat flöde

Som inledning på samtidiga flödesmätningar med kammarmetod och koncentrationsmätningar med laserinstrumentet har en låda fylld med sand använts för att simulera metanemissioner med kontrollerbara flöden och testa om säkra och användbara samband finns. Lådans konstruktion framgår av figur 13.1. Deponigas från Filborna gasuttagssystem leds in underifrån i Lecabädden och fördelas med fördelningsledningar. Deponigasen flödar genom sanden uniformt och mätning av koncentration och flöde kan göras på och ovanför sandytan. En massflödesregulator, där flödet kan regleras mellan 0,2 och 20 l/min kontrollerar inflödet av deponigas i lådan.



Figur 13.1. Låda med sand, för flödesmätning.

En simulering av metanemissioner har utförts i sandbädden där utflödet dels mättes med laserinstrumentet (koncentrationsdata) och kammarmetod (flödesdata). Deponigasflödet varierades från 0,2 l/min till 10 l/min (tabell 13.1).

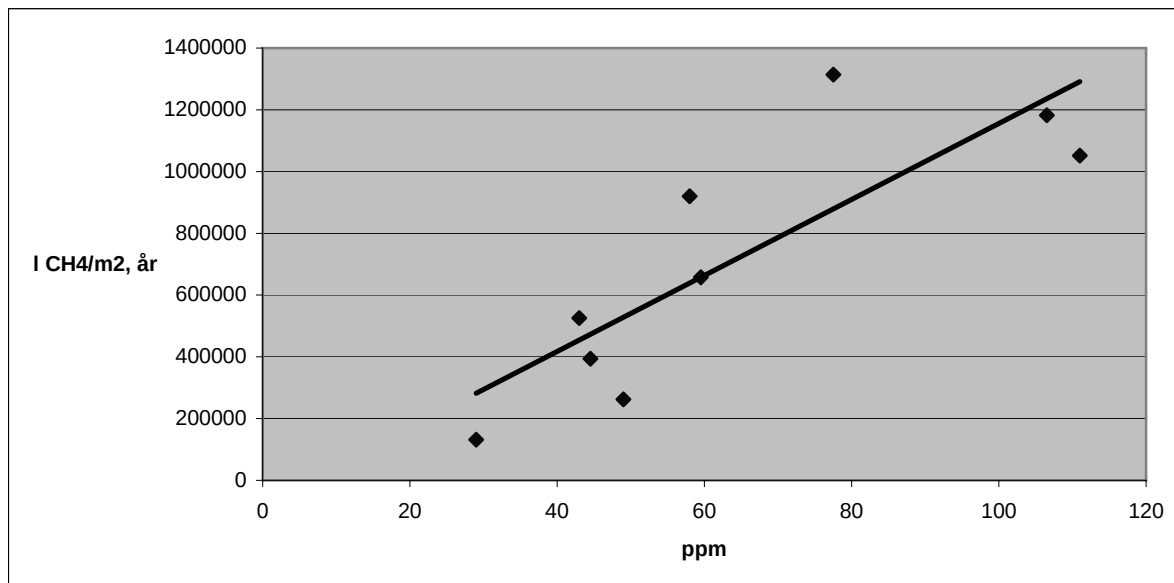
Tabell 13.1. Simulering av utflöde av metangas genom sand för jämförelse mellan kontrollerat flöde och uppmätt flöde.

Gasflöde genom massflödesregulator biogas [l/min]	Kontrollerat flöde av CH ₄ genom sandbädden, Q1 [l/m ² /år]	Uppmätt flöde av CH ₄ med kammarmetoden, Q2 [l/m ² /år]	Kvot O2/Q1	Laserinstrument, koncentration (Medelvärde mätning 2 min) [ppm]
0,2	26280	164308	6,25	24
1	131400	95397	0,72	27
5	657000	147825	0,22	38
10	1314000	333344	0,25	147

Överensstämmelsen mellan kontrollerat flöde och uppmätt flöde med kammarmetoden varierar. De valda utflödena ur sandbädden är relativt höga medan kammarmetodens mätområde är begränsat till relativt låga emissionsnivåer. Enligt denna undersökning är det uppmätta värdet i bäst överensstämmelse med flödet ur sandbädden vid 1 l/min vilket motsvarar 131400 l/m²/år. Vid höga flöden ger kammarmetoden för låga värden och omvänt, vid låga flöden för höga.

Det finns enligt tabellen en viss överensstämmelse mellan uppmätta koncentrationvärden, mätt med laserinstrumentet, och med det faktiska utflödet från sandbädden.

I en särskild undersökning har förhållandet undersökts i flödesintervallet från 1,0 l/min till 10 l/min biogas från sandbädden. Flödet motsvarar 131- 1310 m³/m²/år metan (figur 13.2).



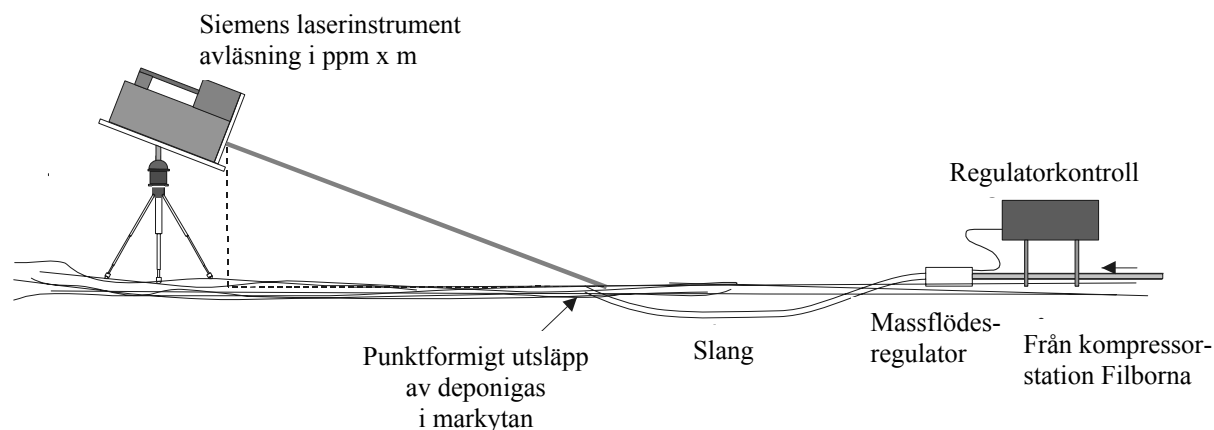
Figur 13.2. Samband mellan utflöde av metan från sandbädden och koncentrationvärde ovan sandbädden, uppmätt med laserinstrumentet.

Det finns ett tydligt samband mellan kontrollerat flöde och mätning med laserinstrumentet, vid högre flöden blir spridningen större, dvs. varje avläsning blir osäkrare.

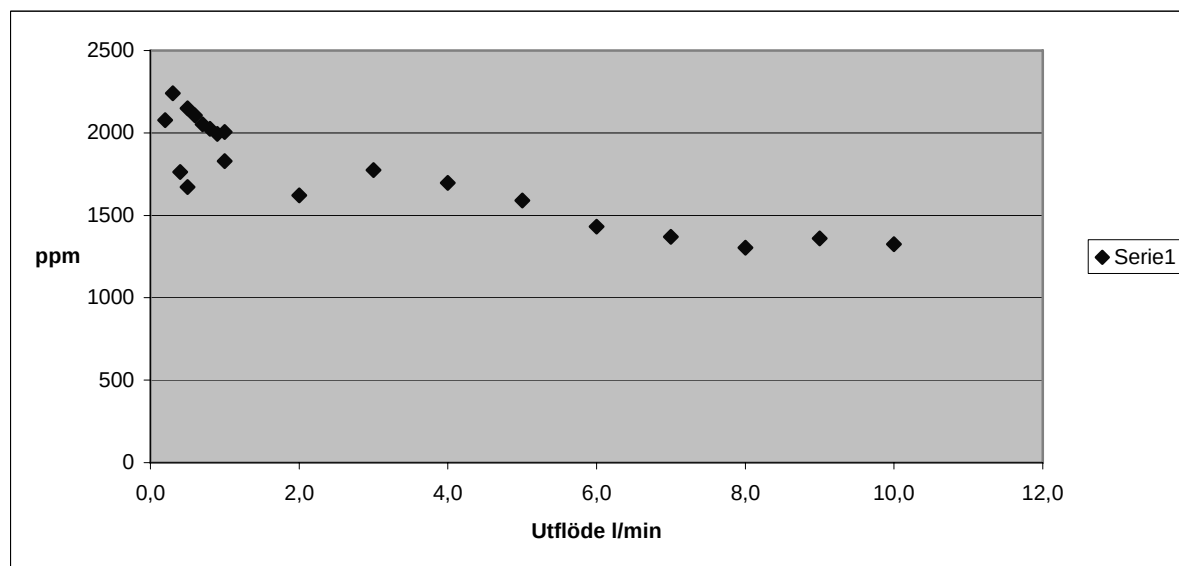
Ett fältförsök med utsläpp från en punktformig källa av deponigas under kontrollerade former har utförts vid Filborna. En slang kopplad till en massflödesregulator grävdes ned i marken

och koncentrationmätning gjordes med laserinstrumentet på 1 m avstånd från det punktformiga utsläppet (figur 13.3).

Vid försöket erhöles en omvänd proportionalitet mot deponigasflödet. Vid låga utflöden erhöles sålunda högre koncentrationvärden än vid högre flöden (figur 13.4). Vid punktformigt utflöde från i detta fall en slang blir utströmningen så koncentrerad och hastigheten så hög vid högre flöden att laserinstrumentet, som varit fast monterat på ett kamerastativ inte fångar gasplymen. Spridningen vid låga flöden kan bero på vind, fastän vinden hela mätperioden legat under 3 m/s.



Figur 13.3. Fältlaborativt försök med mätning av metankoncentrationen från ett kontrollerat punktutsläpp, Filborna 2007.



Figur 13.4. Koncentrationen uppmätt med laserinstrumentet ovan ett punktformigt utsläpp av deponigas.

Enligt iakttagelser från bl.a. de fältlaborativa förstudierna vid BARBARA, Malmö, ger stora flöden genom trånga passager upphov till en jetstråle med en tunn gasstråle närmast markytan och en utbredd gasplym på 1-1,5 m höjd över läckagekällan. Jetstrålen beror på hög

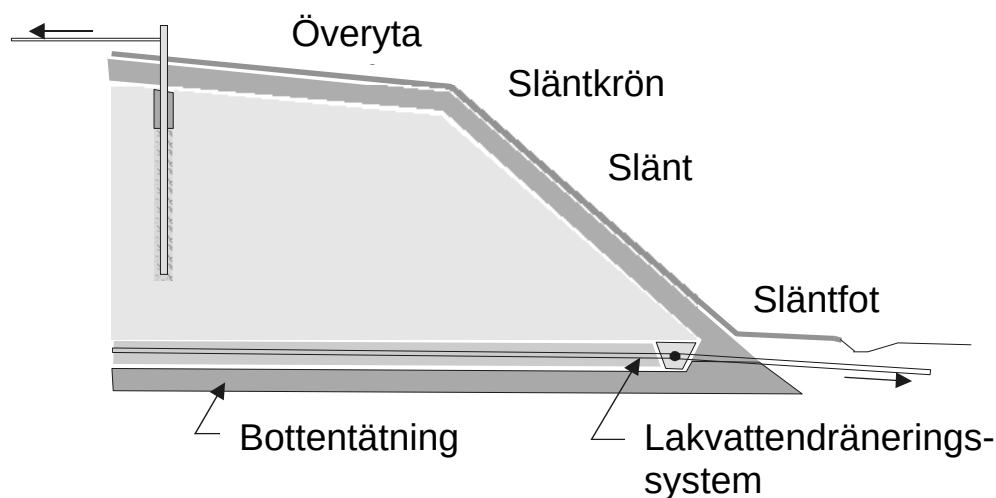
utflödes hastighet. Vid mätning av gasemissioner vid s.k. pinpointing försöker man mäta gasemissionen så nära läckagekällan som möjligt. I fall med en jetstråle försöker operatören träffa den tunna gasstrålen närmast markytan och missar följaktligen den bredare gasplymen ovanför läckagekällan. Vid fältlaborativa studier kan mätningar göras vertikalt på olika höjd samtidigt med flera lasersystem och därigenom erhålla en gaskoncentrationsgradient som ger en bild av gaskoncentrationen på olika nivåer av gasemissionsplymen, inkluderande den tunnare gasstrålen vid markytan och den bredare högre upp utmed gasplymen. Jetstrålefenomenet kan förekomma på en deponi men är främst relaterat till gasemissioner från gasuttags- och lakvattensystem, men i undantagsfall även vid trånga passager vid uppstickande föremål genom en deponiyta.

13.2 Fältmätningar med kammarmetod och laserinstrument

Under vår, sommar och höst 2007 har ett stort antal kombinerade laser- och kammarmetodmätningar utförts vid olika förhållanden vid 7 deponier. Måttillfällena och omfattning framgår av tabell 13.3. Totalt har 20 ytor undersökts och 690 gasprover analyserats.

Under förstudierna till detta projekt kunde vi identifiera typytor, delar av en deponis yta som kunde anses typiska från metanemissionsynpunkt (figur 13.5).

Gasuttagssystem



Figur 13.5. De strukturellt viktiga delarna av en deponi från emissionssynpunkt.

Det har funnits att de i figuren redovisade delarna av en deponi bör undersökas systematiskt, dvs. var för sig. De olika typytorna har olika vikt från emissionsynpunkt. Undersökningsarbetet har därför delats upp så att de olika typytorna värderats från emissionssynpunkt vid de utvalda upplagen. Typytornas vikt från emissionssynpunkt och vilka områden som undersökts vid de olika deponierna framgår av tabell 13.2.

Tabell 13.2. Olika delar av deponiers ytor och klassificering.

	Filborna	Spille- peng	Hagby	Löt	Fors- backa	F1	F2
Överyta Sluttäckning EU- standard	X						
Slänt Sluttäckning EU- standard							
Täckt överyta		X		X	X	X	X
Täckt slänt	X			X	X	X	X
Överyta utan täckning					X		
Slänt utan täckning		X		X	X		X
Läckage gasuppsamlings- system			X			X	X
Läckage lakvattenuppsamlings- system	X	X	X				
Sluttäckning, gamla deponier		X	X			X	X
Tippsår	X						X
Deponi med plastduks- täckning	X					X	



Ytor med övervägande låg
emission av metan



Ytor och installationer med risk
för hög emission



Ytor med risk för delvis hög
emission

Uppdelningen i olika riskkategorier från emissionssynpunkt har gjorts på grundval av de observationer som gjorts i projektet. Begreppet "täckt överyta" innebär att en ytterligare täckningsåtgärd utförts, utöver den sedvanliga jordtäckning som görs när en etapp eller cell slutligt uppfyllts. Den ytterligare åtgärd som ofta gjorts är ytplanering samt påförande av mera jordmassor 0,5-1,0 m.

Ytor eller installationer med risk för hög emission av deponigas utgörs av slänter utan täckning, aktiva tippsår samt system för lakvatten och gasuppsamling. Med hög risk menas att ytan eller installationen har visat hög emission av deponigas i projektet. Tippsår har ständigt en betydande emission. Det är kanske förvånande att gasinstallationer, främst vertikala gasbrunnar och områdena närmast en brunn innebär risk för hög deponigasemission då ett gasuppsamlingssystem oftast har ett applicerat undertryck i de delar som finns inom deponiytan. Våra tidiga undersökningar gav dock bilden att delar av uttagssystem för deponigas inte fungerar på ett avsett sätt.

Utifrån klassificeringen av ytor utvaldes ytor för kombinerad laser- och kammarmetodmätning. Utförda mätningar och fördelning på olika deponier och ytor framgår av tabell 13.3.

Förutom ytfaktorer beror metanemissionen också på avfallsmängd, avfallssammansättning, gasuttagssystemets funktion och deponins ålder.

Tabell 13.3. Mätprogram för kammarmetodmätningar, samt fördelning på olika typytor.

Deponi	Tidpunkt	Typ av yta	Rutförband, m	Förhållanden
Spillepeng	2007-05-31	Täckt överyta	10 x 10	Täckning på testceller
Spillepeng	2007-05-31	Sluttäckt överyta	10 x 10	Täckning, gammal deponi
Filborna	2007-06-01	Sluttäckt överyta	10 x 10	Sluttäckning enligt EU-normer
Filborna	2007-06-01	Täckt slänt	24 x 4	Täckning före sluttäckn.
Filborna	2007-06-01	Sand	2 x 1	Låda för kalibrering
Hagby	2007-06-11	Täckt överyta	10 x 10	Täckning på gammal deponi
Hagby	2007-06-11	Sluttäckt överyta	24 x 4	Täckning på testceller
Löt	2007-06-12	Täckt överyta	10 x 10	Täckning före slutäckn.
Löt	2007-06-12	Slänt	24 x 4	Ej åtgärdad slänt
Forsbacka	2007-06-13	Överyta	10 x 10	Täckning
Forsbacka	2007-06-13	Slänt	24 x 4	Ej åtgärdad slänt
F2	2007-09-25	Överyta	10 x 10	Täckning
F2	2007-09-25	Slänt	6 x 1	Ej åtgärdad slänt
F2	2007-09-25	Slänt	18 x 6	Åtgärdad slänt
F1	2007-09-26	Överyta	10 x 10	Täckning
F1	2007-09-26	Slänt	24 x 4	Ej åtgärdad slänt
F1	2007-09-27	Överyta	50 x 2	Täckning nära släntrön
F1	2007-09-27	Överyta	10 x 10	Täckning
Filborna	2007-12-04	Slänt ↑	10 x 10	Täckning, yta för geoelektr. mätning
Filborna	2007-12-04	Slänt	Samma provyta	Täckning, yta för geoelektr. mätning
Filborna	2007-12-05	Slänt		Täckning, yta för geoelektr. mätning
Filborna	2007-12-12	Slänt ↓		Täckning, yta för geoelektr. mätning
Filborna	2007-12-12	Slänt		Täckning, yta för geoelektr. mätning



Ytor med övervägande låg emission av metan



Ytor och installationer med risk för hög emission

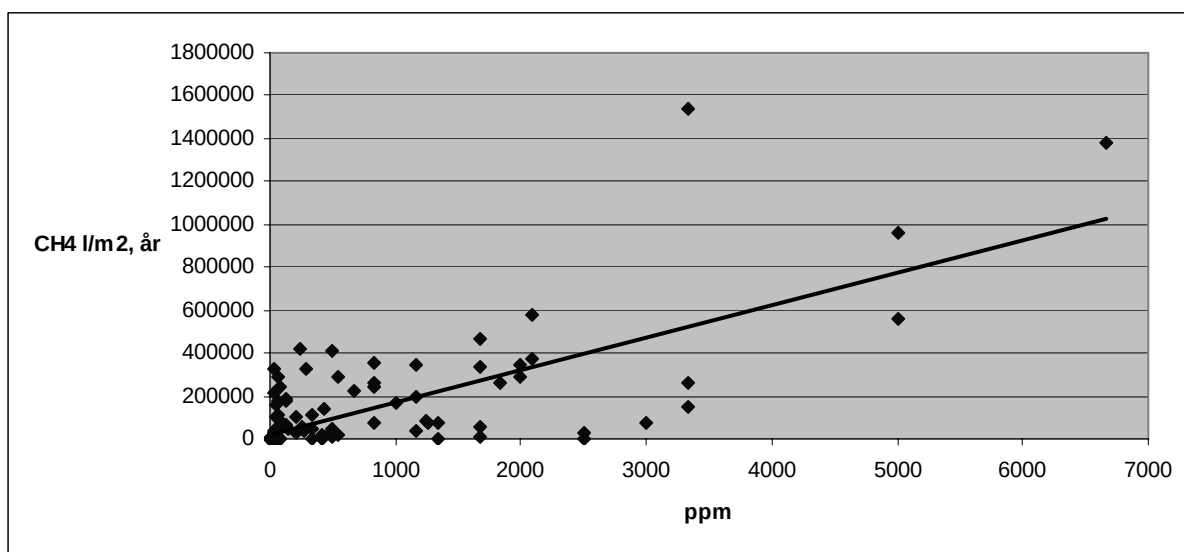


Ytor med risk för delvis hög emission

Släntytorna vid Löt och Forsbacka har ansetts ha högre risk än ytorna vid de franska upplagen F1 och F2. På Filborna har upprepade mätningar gjorts på samma släntyta i december 2007 tillsammans med geoelektricitetsmätningar.

Samtliga platser där kammarmetoden använts har också undersökts med laserinstrumentet, och ett värde på metankoncentrationen i luften ovanför mätplatsen har registrerats. Laserinstrumentet har hållits cirka 0,3 m från ytan och vid registrering av mätvärde har extremvärden uteslutits. Om ett relativt konstant värde erhållits registrerades detta. Vid variationer registrerades ett intervall, vilket senare använts för enkel medelvärdesberäkning.

Om värdepar för samtliga platser vad avser metanflöde enligt kammarmetoden och metankoncentration med laserinstrumentet, oavsett deponi och platsens art ansätts i samma diagram erhålls figur 13.6. Fyra av punkterna kommer från en och samma yta (geoelektricitetsytan). Inom denna yta utfördes samtidig mätning med kammarmetod och lasermetod på samma delytor under tre dagar (tabell 13.3).



Figur 13.6. Samtliga individuella värdepar; metanflöde från kammarmetodmätning och koncentrationer från laserinstrumentet, med trendlinje.

Av diagrammet (figur 13.6) framgår att det finns ett samband mellan mätdata från kammarmetoden och lasermätningarna, dock är antalet värdepar litet. Inom projektet har det inte varit möjligt att utföra flera mätningar. Korrelationen mellan värdeparen får ses som en god indikation på att det är möjligt att med hjälp av kammarmetoden kalibrera laserinstrumentet och erhålla flödesvärden från punktutsläpp som mätts med laserinstrumentet. Spridningen av värdeparen kan bero på flera orsaker, bl.a.:

- vind som påverkar koncentrationsvärdena
- import av luftburen metan från andra delar av deponin
- tidsskillnad mellan lasermätning och kammarmetodmätning.

Enligt tabell 13.3 bör olika typytor ge upphov till olika grad av metanemission som kommer från utsläppen av biogas från deponins inre. Om en uppdelning inledningsvis görs så att alla värdepar från överytter och slänter fördelas efter den relativa riskvärderingen i tabell 13.3, erhålls en mera noggrann bild (se vidare avsnitten 13.5 och 13.6).

13.3 Överytor

Överytor har undersökts med kammarmetod i kombination med lasermätning vid alla de i studien ingående deponierna. Överytorna har dock mycket olika beskaffenhet och också olika emissioner. Vid denna värdering tas inte någon hänsyn till hur effektiv deponigasuppsamlingen är.

Redovisningen av mätresultat nedan grundar sig på medelvärden av mätningar med laserinstrumentet resp. kammarmetoden inom de valda 100 m²-ytorna.

Kammarmetodmätningar har utförts på 10 överytor, inklusive deponierna i Frankrike. En närmare beskrivning av ytorna och förhållandena av mätning framgår av tabell 13.4.

Tabell 13.4. Mätförhållanden, mätning på överytor.

Deponi	Typ av täckning	Temp. [°C, 1 m]	Vindstyrka [m/s]	Vind- riktn.	Yttemp. [°C]	Fukt- förhåll.
Spillepeng, testceller, 2007-05-31	Tjock jordtäckning (över 1 m, sprickor vid cellkanter)	19,7	2,1	NNV	23,2	Torrt
Spillepeng, äldre deponi, 2007-05-31	Jordtäckning 1, 0 m tjocklek	19,7	2,1	NV	23,3	Torrt
Filborna, sluttäckt yta, 2007-05-30	Sluttäckt enligt EU-standard	21,2	2,4	NV	22,3	Torrt
Hagby, testcell E-89	1,0 m torv, plastduk, jordmassor	27,9	1,2	O	31,3	Mycket torrt
Hagby, testcell E-90	Gammal sluttäckning, jord och slam 0,5-2,0 m	25,2	2,7	SO	29,6	Mycket torrt
Löt, norra delen	Mellantäckning, 1 m jordmassor	21,7	2,7	SO	38,7	Torrt
Forsbacka, cellyta	Mellantäckning 0,5-1 m	15,7	1,7	SV	30,5	Torrt
F2, täckt yta	Täckning lerhaltig jord	15	3	SV	15	Något fuktigt
F1, sydvästra hörnet	Täckning lerhaltig jord	11,6	2,1	NV	10,9	Något fuktigt
F1, kal yta vid gasbrunn	Täckning med lerhaltig jord	9,6	3-4	V	10,7	Fuktigt

Variationen i uppmätt metankoncentration (ppm) har varit stor mellan de undersökta överytorna på metanemission vid mättillfällena, vilket framgår av figur 13.7.

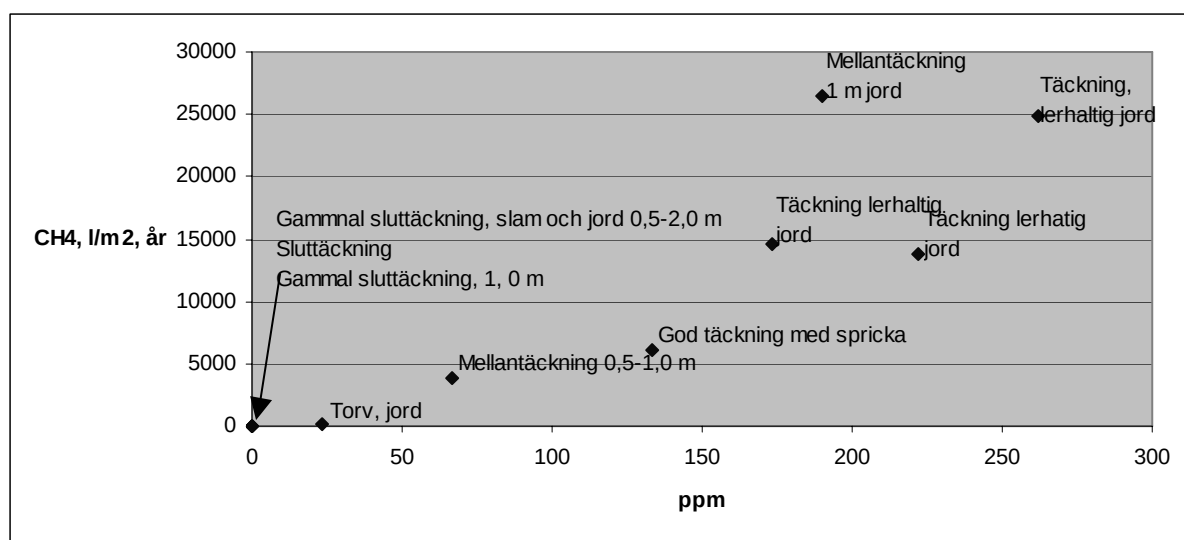
Kammarmetodmätningarna vid undersökningarna har utförts på det sätt som beskrivits i avsnitt 10.4. Lasermätningarna har gjorts efter kammarmetodmätning genom att rikta instrumentet på 0,3 m avstånd mot marken inom den delyta där kammarmätningen skett. Värdeparen har tillkommit genom bildning av medelvärden för metanemissionen på de olika lokalerna, mätt med kammarmetoden och medelvärden av avläsningar med laserinstrumentet vid samma lokal.

Det bör betonas att mätningarnas resultat endast gäller vid mättillfället. Ett antal variabler som påverkar metanmissionen kan ändras snabbt vilket medför andra koncentrationer vid mätning med laser ovan deponiytan och andra flöden vid mätning med kammarmetoden.

Det finns ett tydligt samband (korrelationskoefficient = 0,95) mellan kammarmetodmätningens flödesvärden och registreringarna från laserinstrumentet.

Ett utsläpp på 25000 l/m²/år dvs. ca 50 m³/m²/år deponigas (50 % metan), motsvarar 0,5 Mm³/ha/år deponigas. Ett sådant utsläpp är helt rimligt i de flesta fall förutsatt att utvinningssystemet ej är optimerat. De lägre emissionerna innebär troligen att gasuttags-systemet fungerar tillfredsställande eller att avfallet är nära helt nedbrutet.

I diagrammet visas också karakteriseringen av ytan, dess täckning. Utifrån denna karakterisering kan inga slutsatser dras. Trenden är dock att ytor över äldre avfall generellt visar lägre emission av metan.



Figur 13.7. Metanemissionen vid de undersökta överytorna sommaren 2007, omräknade till värdepar av uppmätta metanemissioner med kammarmetoden respektive laserinstrumentet.

Två av punkterna skiljer sig från den enkla trenden som kan ses i diagrammet, figur 13.7. Ett högre medelvärde vad avser avläsningarna med laserinstrumentet erhöles vid upplag F2, vilket kan bero på att mätningarna utfördes nära aktiva tippsår med höga utsläpp av metan. Bakgrundsnivån på platsen kan därför ha höjt medelvärdet. Det finns också ett värdepar där laserinstrumentets medelvärde ligger under den generella trenden vilket kan bero på att platsen var mycket utsatt för vind (Löt). Vindhastigheten var vid mättillfället ej särskilt hög men vindexponeringen maximal, på den högsta toppen av deponin.

13.4 Slänter och släntkrön

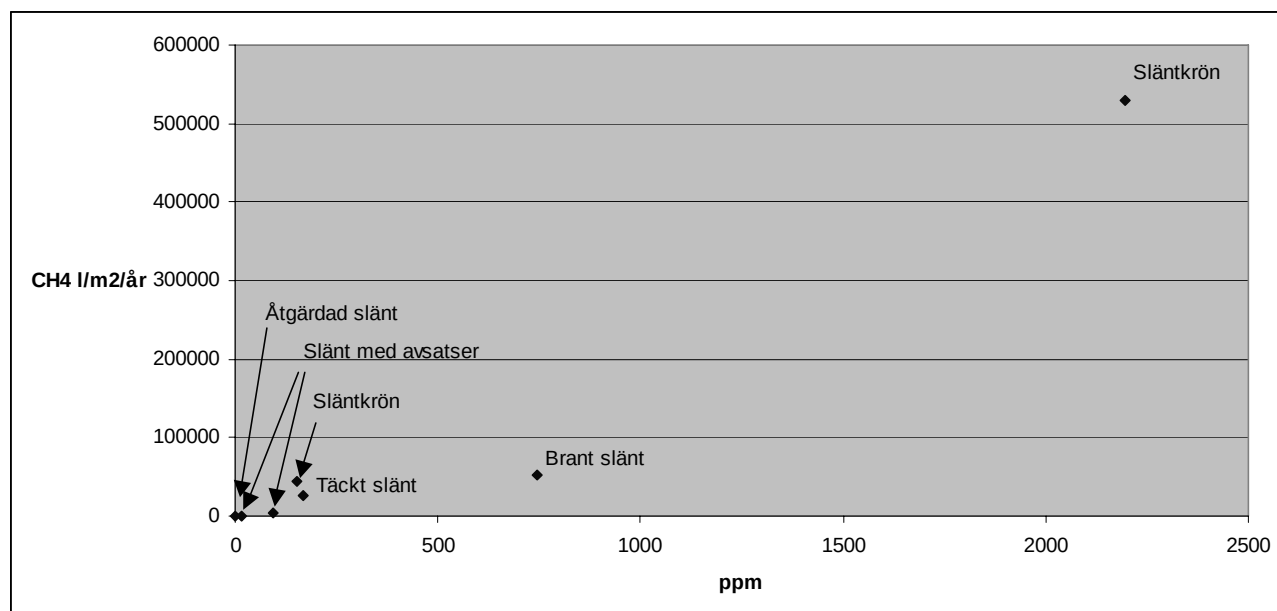
På samma sätt som för överytor har slänter vid fem deponier undersökts på 7 platser. De undersökta slänternas egenskaper samt mätförhållandena framgår av tabell 13.5. Mätningar med laserinstrument och kammarmetod har utförts på samma sätt som beskrivits i avsnitt 10.

Redovisningen av mätresultat nedan grundar sig även här på medelvärden av mätningar med laserinstrumentet och kammarmetoden inom ytorna 10 x 10 m.

Tabell 13.5. Mätförhållanden, mätning på släntytor.

Deponi	Typ av täckning	Temp. [°C, 1 m]	Vindstyrka [m/s]	Vind- riktn.	Yttemp. [°C]	Fukt- förhåll.
Filborna, östra slänten, 2007-06-01	Täckning med ospecificerade oorganiska massor 0,5-2,0 m	20	0,5-1,5	NV	20	Torrt
Löt, norra delen, 2007-06-12	Täckning, oorganiska massor, mycket varierande tjocklek	18,9	0,6	V	28,2	Torrt
Forsbacka, slänt i norr, 2007-06-13	Täckning, oorganiska massor, mycket varierande tjocklek	16,7	1,4	SV	23,9	Torrt
F2, täckt slänt	God täckning, jordmassor	15	4	SV	17	Fuktig yta
F2, släntrön	Täckning, men brant slänt bitvis tunn täckning	15	3	SV	16	Fuktig yta
F1, norra hörnet	Täckning med oorganiska massor, brant slänt	11,7	3,4	NV	14,9	Torrt
F1, släntrön mot väg	Täckning med jordmassor, sprickor	13,4	2,7	Ö	12,0	Torrt

Även vad gäller slänter kan en trend erhållas, dvs. högre medelvärde vad avser emission mätt med kammarmetoden, ger högre medelvärde med laserinstrumentet. Sambandet framgår i figur 13.8.



Figur 13.8. Värdepar skapade från provtytor på slänter och släntrön.

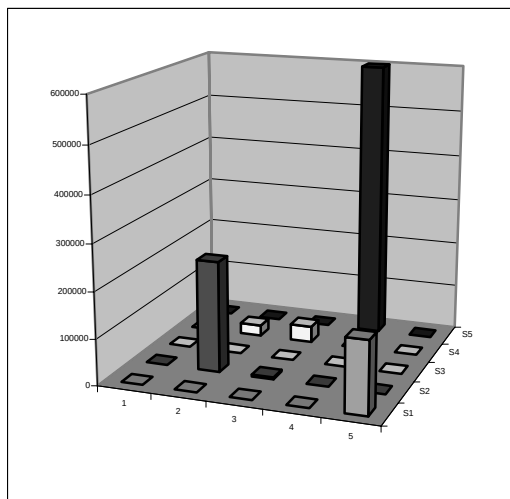
Av figur 13.8 framgår att det finns ett klart samband (korrelationskoefficient = 0,98) mellan mätningarna med laserinstrumentet och flödesbestämningarna genom kammarmetoden.

Två provytor består av slänkrön, dvs. övergången mellan slänt och överyta. Vid den ena av dem har punktutsläpp mätts direkt med laserinstrumentet och med kammarmetoden, och värdepar har skapats. Lokalen kan ses som exempel på ett område där frekventa punktutsläpp påträffats, och som utgör en representativ yta för ett slänkrön med dålig täckning. Denna yta har tagits med i diagrammet tillsammans med en annan provyta som också utgörs av ett slänkrön, men med lägre emissionsnivåer.

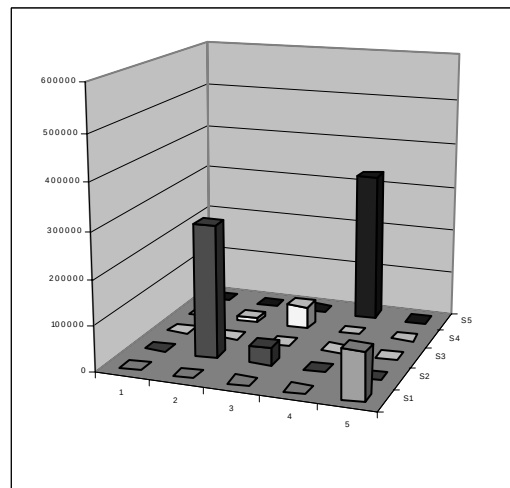
Genomgång av det samlade materialet från utförda kammarmetodmätningar visar att slänter ger högre emission per ytenhet än överytor. Detta bekräftas också av resultatet från ytskanning med laserinstrumentet och från detektion av punktutsläpp.

13.5 *Provyta i slänt, upprepade mätningar*

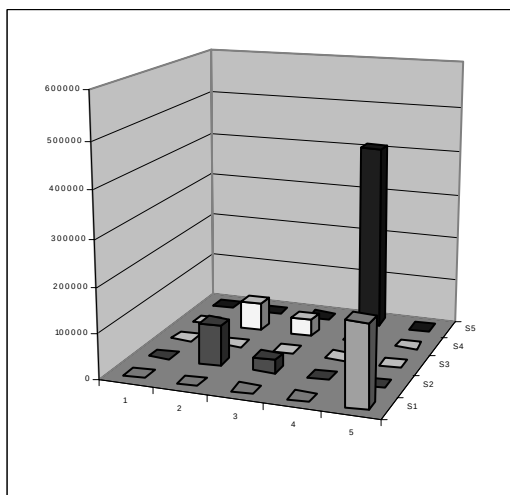
I samband med försök med resistivitetsmätningar utfördes fem kammarmetodmätningar i en slänt på Filborna i december 2007. Resultaten spelar en viktig roll för att tyda geoelektricitetsmätningarna och visas i figur 13.9 i form av stapeldiagram. Undersökningarna utfördes i en slänt på en kvadratisk yta 10 x 10 m.



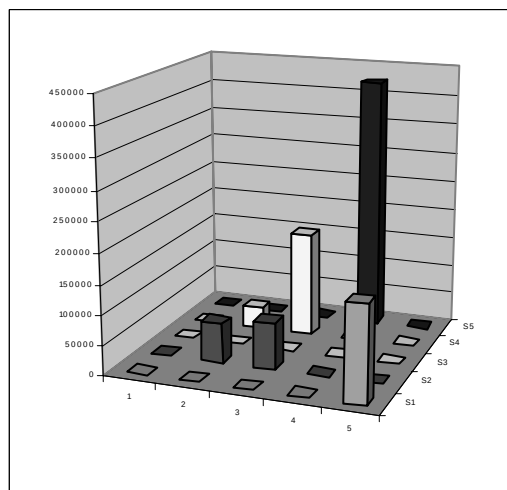
4 dec 2007, kl 12:22, 1002 hPa, stigande



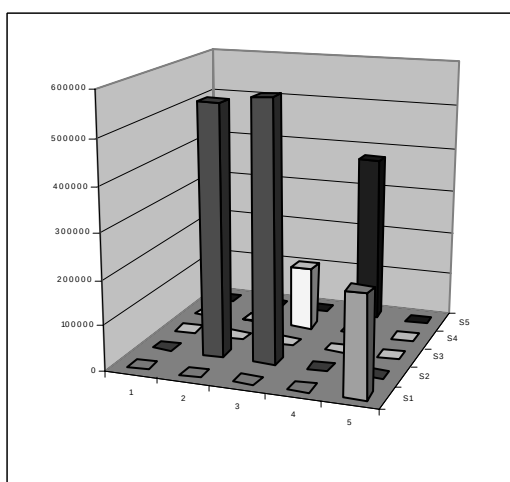
4 dec 2007 kl 16:20, 1006 hPa stigande



5 dec 2007, kl 12:55, 1005 hPa sjunkande



5 dec 2007, kl 15:30, 1004 hPa, sjunkande



12 dec 2007, kl 10:30, 1020 hPa stigande

Figur 13.9. Resultat från kammarmetodmätningar på yta 10 x 10 m. Emission av metan för de olika delytorna vid olika tidpunkter, l/m²/år.

Resultaten från kammarmetodmätningarna vid "geoelektricitetsytan" visar:

- En och samma delyta kan uppvisa emission som är nära noll vid ett mättillfälle och en vecka efteråt uppvisa det största värdet av alla, vilket indikerar att mycket stora variationer kan erhållas över tiden.
- En annan delyta visar stabila emissionsvärden under hela mätperioden, trots att punkten ligger endast 5-6 m från delytan med stora variationer i metanemission.
- De fyra första mätningarna ger var och en ett medelvärde i ett intervall 32032-44152 l/m²/år, medan mätningen som görs en vecka senare ger ett medelvärde av 74936 l/m²/år, dvs. nära dubbelt så stor emission. Lufttrycket är vid denna senare tidpunkt högre än vid de fyra första mättillfällena (1006 hPa den 5 december 2007 och 1037 hPa den 12 december 2007).

Den stora variationen i både tid och rum orsakar tvivel om kammarmetodens lämplighet att använda på deponier, vilket också styrks av resultat från andra studier (Börjesson et al., 2000). En metod som kan mäta flöde direkt över en stor yta är nog nödvändig för att erhålla tillräcklig tillförlitlighet. Vissa problem kvarstår, om man lyckas att mäta flöde snabbt på en yta, hur skall man tolka det enstaka värdet i en punkt, och hur många mätningar behövs för att ge ett tillförlitligt användbart värde för att beräkna flödet per årsbasis?

13.6 *Resultatöverföring av kombinerade mätningar med laser och kammarmetodsmätningar till emissionsberäkningar*

Mätningarna med laserinstrumentet har gjorts på de delytor där kammare ställts för flödesmätning. De egentliga värdeparen omfattar således mycket små deponiytor. Dessutom representerar de emissioner där laserinstrumentet registrerat ett utläckage, med en låg emission, (under 0,1 l/min vid ett punktutsläpp) detekterbar bara med kammarmetoden, laserinstrumentet visar då 0 ppm.

Punktvisa utsläpp

Metanemissionen från deponiytorerna kan delas upp i punktläckage och diffus avgång från deponiytorernas olika delar. Genom att kombinera lasermätningarna och mätningarna med kammarmetoden kan punktutsläppens sammanlagda storlek beräknas. Exempel på täckande mätningar på deponier består framför allt av mätningarna på deponier i Frankrike. Punktutsläppen vid F1 och F2 var 102 resp 75 till antalet.

Vid beräkning av det sammanlagda utsläppet vid deponierna har sambandet $\text{CH}_4 \text{ l/m}^2/\text{år} = 151,1 * \text{ppm} + 23058$ använts.

Sambandet får betraktas som relativt osäkert då ett fåtal mätningar utförts. Men det visar ändå att samband finns, och att detta samband troligen kan göras säkrare om ett större antal värdepar skapas.

Om sambandet enligt ovan används på samtliga funna punktutsläpp vid deponierna F1 och F2 erhålls för de bägge deponierna deponigasemissioner som visas i tabell 13.6.

De totala emissionerna från deponierna är från 2005. Deponiytorerna år 2005 har uppskattats vara desamma som de som skannats 2007.

Tabell 13.6. Total emission från punktutsläpp och jämförelse med tidigare beräknad metanemission från deponierna F1 och F2.

Deponi	Emission från punktutsläpp, detekterade och uppmätta med laserinstrumentet [ton/år]	Emission av metan (från tabell 11.3) [ton/år]	Andel punktutsläpp av total emission [%]
F1	41	331	12
F2	30	1620	2

Metanläckage från deponiytor

Metanemissionerna från karakteristiska ytor vid varje deponi kan användas för att beräkna läckaget från en deponi. Liksom ovan har exemplen F1 och F2 använts för beräkningarna. Vid beräkningar har resultaten från dessa bägge deponier använts så långt möjligt. Resultat av beräkningen framgår av tabell 13.7.

Tabell 13.7. Beräkning av metanemission från ytor, uppdelning på karakteristiska delytor, för F1, F2.

Deponidel	F1			F2		
	Yta [ha]	[l/m ² /år]	Läckage CH ₄ [m ³ /år]	Yta [ha]	[l/m ² /år]	Läckage CH ₄ [m ³ /år]
Överyta, gammal deponidel, god täckning, avfall >10 år	9,1	0	0	5	0	0
Överyta, nyare deponidel, avfall 5-10 år	5	14000	700000	2,3	14000	322000
Överyta, ny deponidel < 5 år	0	0	0	1,2	26000	312000
Åtgärdad slänt, gammal upplagsdel	1,8	0	0	2,5	0	0
Slänt, nyare del	0,3	200000	600000	2	26000	520000
Totalt:			1300000	13		1154000

F1

Läckaget från deponiytorna vid upplag F1 har beräknats till 1300000 m³ CH₄ per år, vilket är mera än vad som SITA uppgivit (466000 m³).

F2

Beräkningen enligt tabell 13.7 är lägre än vad som uppgivits av SITA år 2005 (2280000 m³ CH₄). Härtill skall punktutsläppet om 30 ton läggas, som är litet i förhållande till läckage från deponiytorna. Läckaget från den aktiva ytan som består av två celler med färskt tillfört avfall är troligen större, det saknas mätningar som kan ge mera tillförlitliga värden. Vid upplag F2 fanns också ett fåtal punkter med mycket stora läckage från deponigasinstallationer som inte heller kunde flödesbestämmas.

Det kan sägas att beräkningarna bygger på för få bestämningar med kammarmetoden. Det viktiga är att en indelning görs på de sätt som återges i tabell 13.7 där typytorna anges och specifikt läckage sedan kan antas. Det är mätningarna med laserinstrumentet som ligger till grund för ytindelningen.

14 RESISTIVITETSMÄTNINGAR

14.1 *Bakgrund och syfte*

Geoelektriska mätningar har flera tillämpningsområden i samband med avfallsanläggningar, framför allt när det gäller grundvattenföroreningar från avfallsdeponier. Lakvatten från till exempel deponier för hushållsavfall och gruvavfall har oftast höga jonkoncentrationer och därmed låg elektrisk konduktivitet och därför kan geoelektriska mätningar vara intressanta för kontroll av påverkan på grundvatten vid deponier.

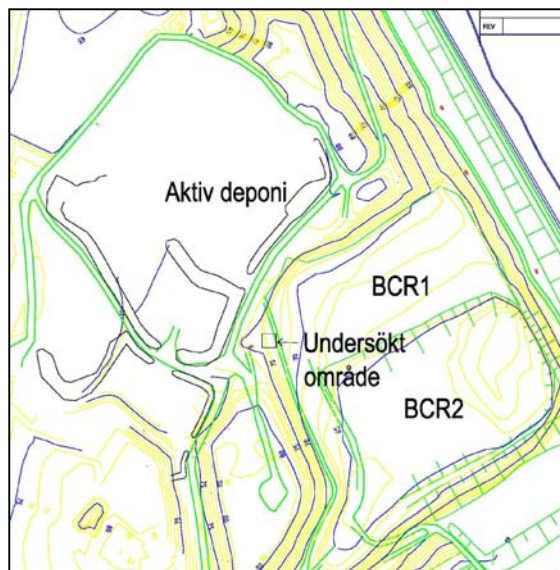
Geoelektriska mättekniker har även etablerats som en teknik för undersökning av olika processer vid avfallsdeponier (t.ex. Bernstone och Dahlin, 1997, Rosqvist et al., 2003, Cardelli och Di Filippo, 2004), och under senare år har undersökningar som rör processer inne i deponin ökat (Guerin et al., 2004, Moreau et al., 2004, Rosqvist et al., 2005, Rosqvist et al., 2007). Vid dessa studier har huvudsyftet varit att undersöka vattenhaltens påverkan på resistiviteten men även andra faktorer som till exempel gasrörelser, jonkoncentration och temperatur har studerats.

Huvudsyftet med resistivitetsmätningarna i detta projekt var att undersöka möjligheten att utnyttja resistivitetsmätningar för att detektera gasrörelser i en deponi. För att utveckla tekniken användes en försöksuppställning för att mäta resistiviteten i avfallet tredimensionellt (3D). Fördelen med 3D-mätningar är att man kan få en tydligare bild av förhållandena, eftersom varje mätning påverkas av den markvolym där mätningen sker. Av praktiska skäl har resistivitetsmätningar länge utförts i två dimensioner (2D) längs en linje. Det räcker om strukturernas utbredning förväntas vara oförändrade vinkelrätt mot mätlinjen. Deponier är starkt heterogena i alla riktningar, därför är en 3D undersökning bättre lämpad där. Resistivitets mätningar i 3D kräver tyngre fältlogistik och beräkningsprogram, men teknikutvecklingen under senare år gör att dessa svårigheter nu börjar bli överkomliga. Ett ytterligare syfte med mätningarna var att undersöka möjligheterna att jämföra gasrörelser under markytan (resistivitetsmätningarna) med gasemissioner ovan markytan (laser och statisk kammare).

14.2 *Material och metod*

14.2.1 Området för fältexperiment

Området som valdes som fältlokal är beläget i en slänt där Filbornadeponin ansluter till en biocellreaktor (se figurerna 14.1 och 14.2). Avfallet som har lagts i biocellreaktorn har högt organiskt innehåll, vilket innebär att mycket deponigas genereras i avfallet. Område valdes för mätningarna till följd av att det fanns vetskap om att det läckte mycket gas genom jordtäckningen i slänten vid bioreaktorn. Såväl luktoobservationer som mätningar med laser hade tydligt indikerat ett relativt kraftigt läckage av gas genom jordtäckningen i slänten.



Figur 14.1. Lokalisering av området för fältexperimenten.

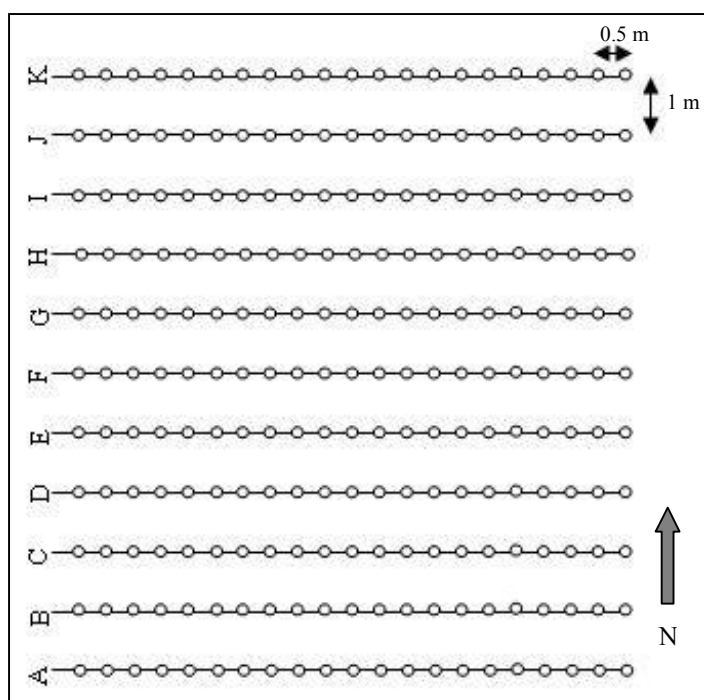
Mätningarna utfördes på en yta som var tio gånger tio meter i en slänt där biocellreaktorn ansluter till Filbornadeponin. Mätningarna genomfördes längs elva parallella linjer med ett avstånd på en meter (figurerna 14.3 och 14.4).



Figur 14.2. Området för fältexperimenten. De gula banden visar placeringen av de elva linjerna där resistivitmätningarna utfördes.



Figur. 14.3. Området för fältexperimentet som visar uppställningen för resistivitetsmätningar och de statiska kamrarna. Linje A är längst till höger i bilden (jämför figur 14.4).



Figur. 14.4. En skiss som visar placeringen av linjerna A-K och de 231 elektroderna.

14.2.2 Utrustning

För fältarbetena användes resistivitetsinstrument ABEM Lund Imaging System, vilket består av mätinstrument Terraohm RIP24 version 2, strömförstärkare ABEM Booster SAS 2000, Electrode Selector ES10-64, stålelektroder (4 mm rostfri stång) samt flertalet kopplingsanordningar, batterier, och ledarkablar (figurerna 14.3, 14.5 och 14.6).



Figurer 14.5 och 14.6. Kablar och elektroder som för strömmen ner i marken.

För varje enskild resistivitmätning används 2 strömelektroder genom vilka ström skickas ner i marken och potentialskillnader mäts mellan 2 eller fler andra elektroder. Ett system av reläväxlar som kontrolleras av ett datorprogram styr i viken ordning mätningarna skall utföras. För att få en bättre upplösning på djupet, trots det korta avståndet mellan elektroder, användes en pol-dipol uppställning vid mätningarna (Dahlin och Zhou, 2004). När försöksuppställningen är etablerad sker alla mätningar helt automatiskt och all mätdata lagras i separata filer inför tolkningen av resultaten.

14.2.3 Mätningar

Resistivitmätningarna utfördes under fyra dagar, 3-5 december samt den 12 december 2007, av Tyréns AB.

Varje mätlinje innehöll 21 elektroder med ett inbördes avstånd på 0,5 meter vilket innebär att 231 fasta elektroder användes vid mätningarna (figur 14.4). För att undvika att elektrodernas

positioner rubbades under mätningen, placerades samtliga elektroder ut innan mätningarna påbörjades. Under mätningarna flyttades endast kablarna mellan mätlinjerna. Varje linje tog mellan 20-30 min att etablera och mäta, vilket medför att en det tog 5-6 timmar att mäta alla elva linjerna. Detta innebär att 3D-resultaten ger en mer översiktlig information av förändringar i resistiviteten i marken, medan 2D-resultaten bör användas för att bedöma relativt snabba skeenden i marken.

En mätomgång består av mätningar på linjerna A-K. Totalt genomfördes sju mätomgångar. Varje mätomgång startades med mätning längs linje A som efterföljades av B, C t.o.m. K. Datum och tid för start respektive slut för de olika mätomgångarna redovisas i tabell 14.1. Exakta tidsangivelser för respektive linje redovisas i bilaga 8.

Tabell 14.1. Mätomgångarnas datum, starttid och sluttid.

Datum	Mätomgång	Tid för start	Tid för slut
2007-12-03	1	11:00	17:00
2007-12-04	2	08:00	13:00
2007-12-04	3	14:00	18:00
2007-12-05	4	08:15	13:30
2007-12-05	5	14:00	18:00
2007-12-12	6	08:15	12:45
2007-12-12	7	14:00	17:15

Totalt genomfördes 79 mätningar vilka namngivits efter linjenamn och mätomgång (tabell 14.2). 77 av linjerna följer ovan nämnda schema. Därutöver genomfördes ytterligare två mätningar av linjen "I" strax efter avslutande av mätomgång 1. Dessa två extra mätningar har namngivits I1B och I1C. Syftet med de två extra mätningarna var att se om någon noterbar förändring av resistiviteten kunde uppmätas under ett kortare tidsintervall.

Tabell 14.2. Benämning av mätningarna.

Linje Mät- omgång	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1	I1	J1	K1
2	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2	I2	J2	K2
3	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3	I3	J3	K3
4	A4	B4	C4	D4	E4	F4	G4	H4	I4	J4	K4
5	A5	B5	C5	D5	E5	F5	G5	H5	I5	J5	K5
6	A6	B6	C6	D6	E6	F6	G6	H6	I6	J6	K6
7	A7	B7	C7	D7	E7	F7	G7	H7	I7	J7	K7

Punkterna är inmätta i Helsingborgs lokala koordinatsystem (bilaga 9).

14.2.4 3D Invers modellering

De uppmätta resistivitetsvärdena är s.k. skenbara resistiviteter, där varje mätvärde påverkas av en volym och representerar alltså inte en lokal egenskap i marken. För att kunna få en bild om hur resistivitet varierar under marken, måste mätningarna tolkas med ett numeriskt datorprogram som utför invers modellering. Att beräkna (försäga) mätdata när miljön och signalkällan är kända kallas för direkt modellering men att genom beräkningar beskriva miljön (t.ex.) när signalkällan är känd och mätdata finns kallas för invers modellering.

Våra mätdata har vi invers modellerat på två sätt:

- Först har alla resultat för alla linjer samlats för att beräkna en 3D modell av resistivitet i marken, vid en tidpunkt (3D invers modellering med Res3Dinv[©]).
- Sedan har varje linje modellerats för sig vid de olika tidpunkter (2D time-lapse invers modellering med Res2D inv[©]).

Båda programmen är kommersiella och beskrivna av de Groot-Hedlin och Constable (1990) respektive Loke och Barker (1996) och följer ungefär samma princip. De försöker minimera skillnaden mellan de uppmätta värdena och de beräknade värdena. Först väljer programmet en modell som den successivt ändrar på tills överenskommelsen är tillfredsställande. Vi har använt den s.k. L1-norm, det vill säga att skillnaden som vi försöker minimera är summan av all absoluta skillnader för alla mätningar.

Inversmodellering innebär ett stort antal beräkningar måste utföras, och antalet beräkningar ökar med mängden mätdata men kan ändå göras på en vanlig dator. Det finns en rad olika metoder för att utföra invers modellering. Vi har använt den programvara som är mest känd och väl beprövad.

För att beräkna skenbara resistiviteten är marken uppdelad i ett antal celler där resistiviteten är konstant. Dessa celler är mindre vid markytan, eftersom mätningarna ger högre upplösning och därmed bättre information där, och de följer topografien i sin form. I 3D modellering är cellerna slutna, men i 2D modelleringen sträcker de sig oändligt vinkelrätt mot mätlinjerna. För att jämföra mätningar i samma mätlinje som är utförda vid olika tillfällen utnyttjas Time-lapse metoden, vilken alltså gör det möjligt att tolka tidsberoende skillnader.

Ytterligare information om resistivitetsmätningar och invers modellering finns på www.geoelectrical.com.

14.3 Resultat av resistivitetsmätningar

I detta kapitel presenteras resultaten av resistivitetsmätningarna som absoluta värden (Ωm) och som relativa tidsskillnader (time lap inversion). Vidare så jämförs resistivitetsmätningarna med resultaten från mätningar med laser och statisk kammare som utfördes vid samma tillfälle.

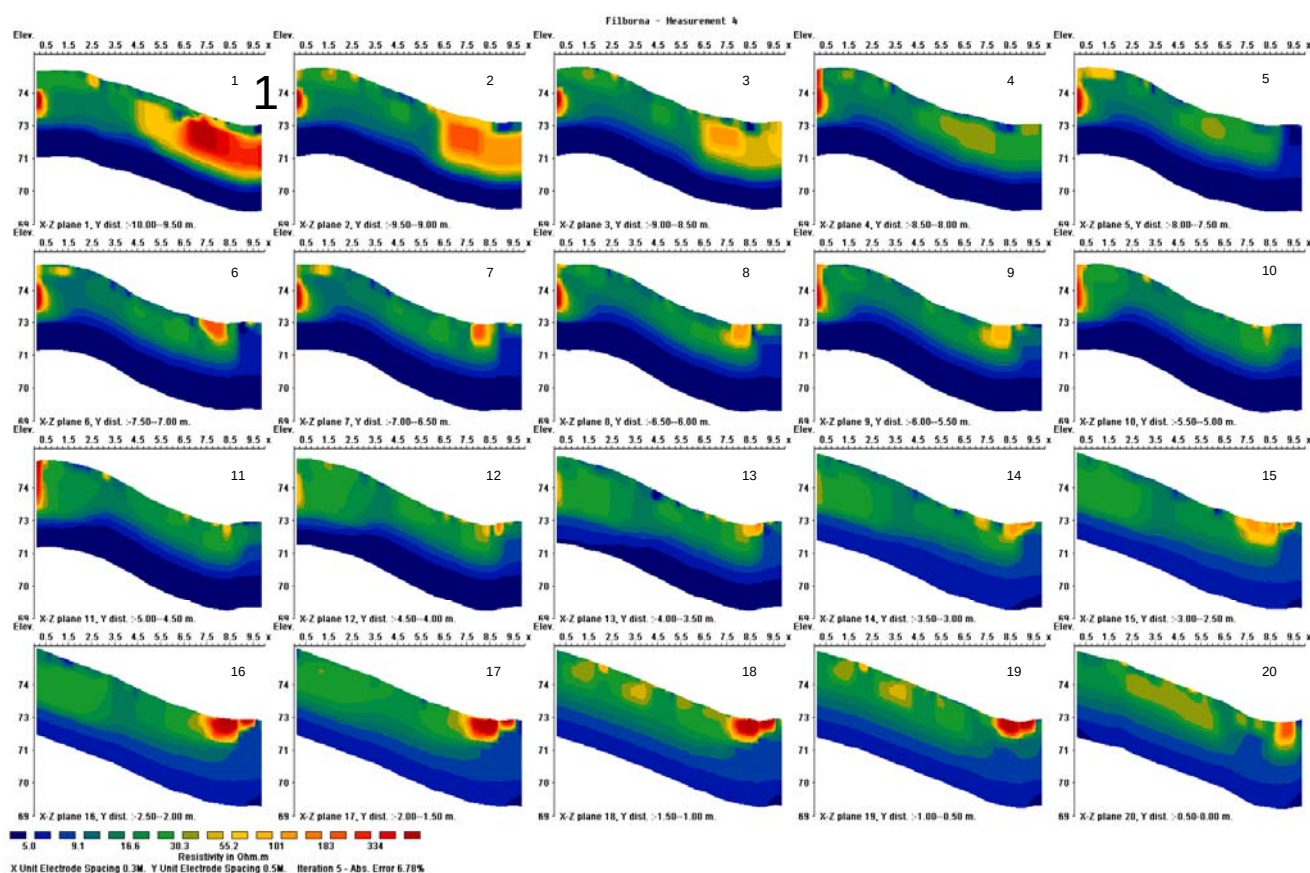
Fälтарbetet utfördes under för tillämpningen goda mätförhållanden vilket resulterade i god kvalitet på fältdata vid samtliga sju mätomgångar. Mätningarna genomfördes utan några komplikationer och med god elektrodkontakt, vilket innebär att signalen är stark och pålitlig. Resultaten indikerar god överensstämmelse mellan mätningarna vilket medför att en relativt pålitlig bild av förhållandena under markytan kan erhållas. Antalet elektroder bedöms vara tillräckligt för att få en god bild av förhållandena under markytan ner till några meters djup.

14.3.1 Resistivitet – absoluta värden

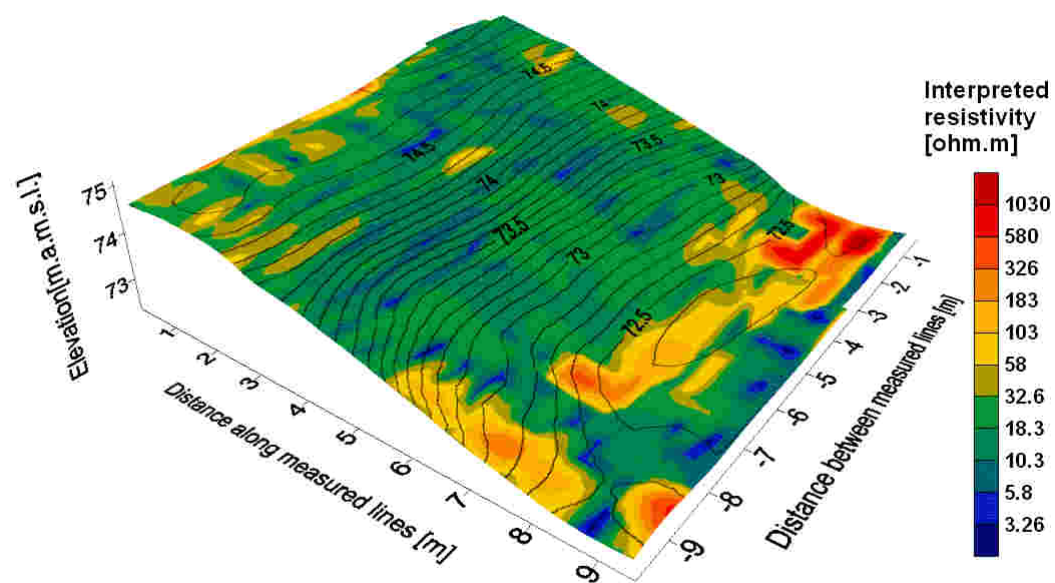
I figur 14.7 visas resultaten från en av de sju mätomgångarna som 2D-sektioner, samtliga mätningar finns redovisade i bilaga 10. Sektionen i det övre vänstra hörnet (nr. 1) representerar en volym parallellt med linje K, sektionen längs ned till höger (nr. 20) parallellt med linje A. Linjernas läge framgår av figur 14.4.

I de övre två metrarna av marken varierade resistiviteten i stora områden mellan ca 10 till 50 Ωm . Den relativt låga resistiviteten stämmer väl överens med, eller är något lägre än tidigare undersökningar som har rapporterats av Guérin et al. (2004) och Bernstone och Dahlin (1997). Hög vattenhalt, joninnehåll och hög organisk halt kan delvis förklara den låga resistiviteten.

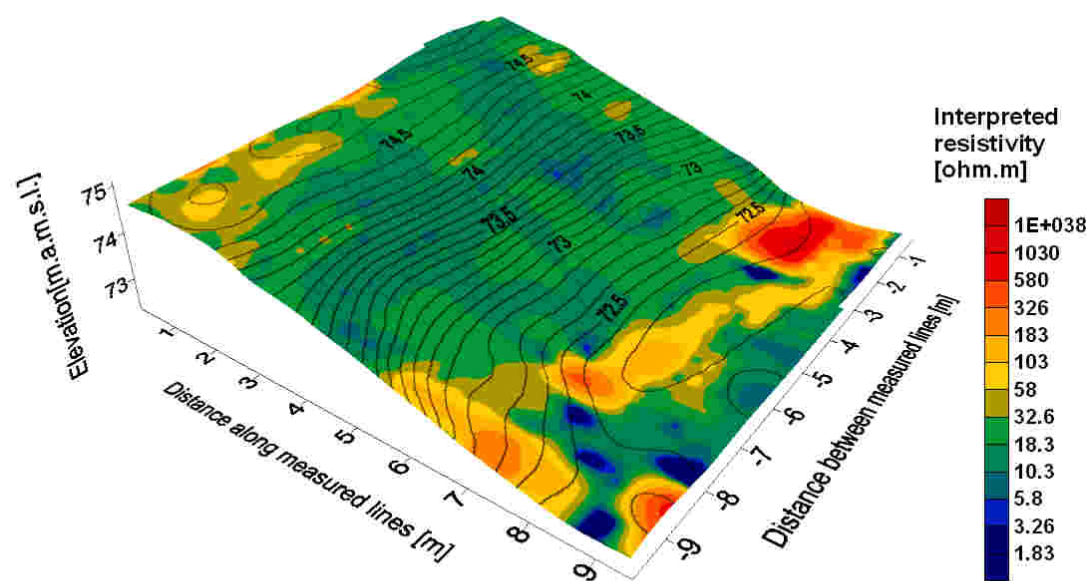
Även zoner med mycket högre resistivitet registrerades vid mätningarna. Högt gasinnehåll i marken kan delvis förklara den förhöjda resistiviteten, men det finns även andra parametrar som kan påverka resistiviteten, som till exempel temperatur (Guérin et al., 2004). I nästan samtliga mätningar kunde en zon med hög resistivitet, över 300 Ωm , detekteras vid släntfot (figur 14.7). Sannolikt beror den höga resistiviteten vid släntfot till stor del på gasrörelser i marken. Biocellreaktorn ansluter till den stora deponin vid släntfot och det kan antas att mycket av gasen som genereras i biocellreaktorn rör sig horisontellt mot släntfot och ansamlas vid släntfot. Biocellreaktorn är täckt med en plastduk vilket medför att gasen inte kan röra sig ut i atmosfären. Vid tidigare resistivitetmätningar utförda hösten 2006 har samma fenomen med förhöjningar i kanten av BCR-anläggningen kunnat iaktas (Rosqvist et al., 2007).



Figur 14.7. Resultat av 3D resistivitetmätningar 2007-12-03, illustrerade som 2D sektioner. Sektion 1, längst upp till vänster, representerar en volym parallellt med linje K och sektionen 20, längs ned till höger, parallellt med linje A.



Interpreted resistivity for the first time step in the first layer



Interpreted resistivity for the first time step in the second layer

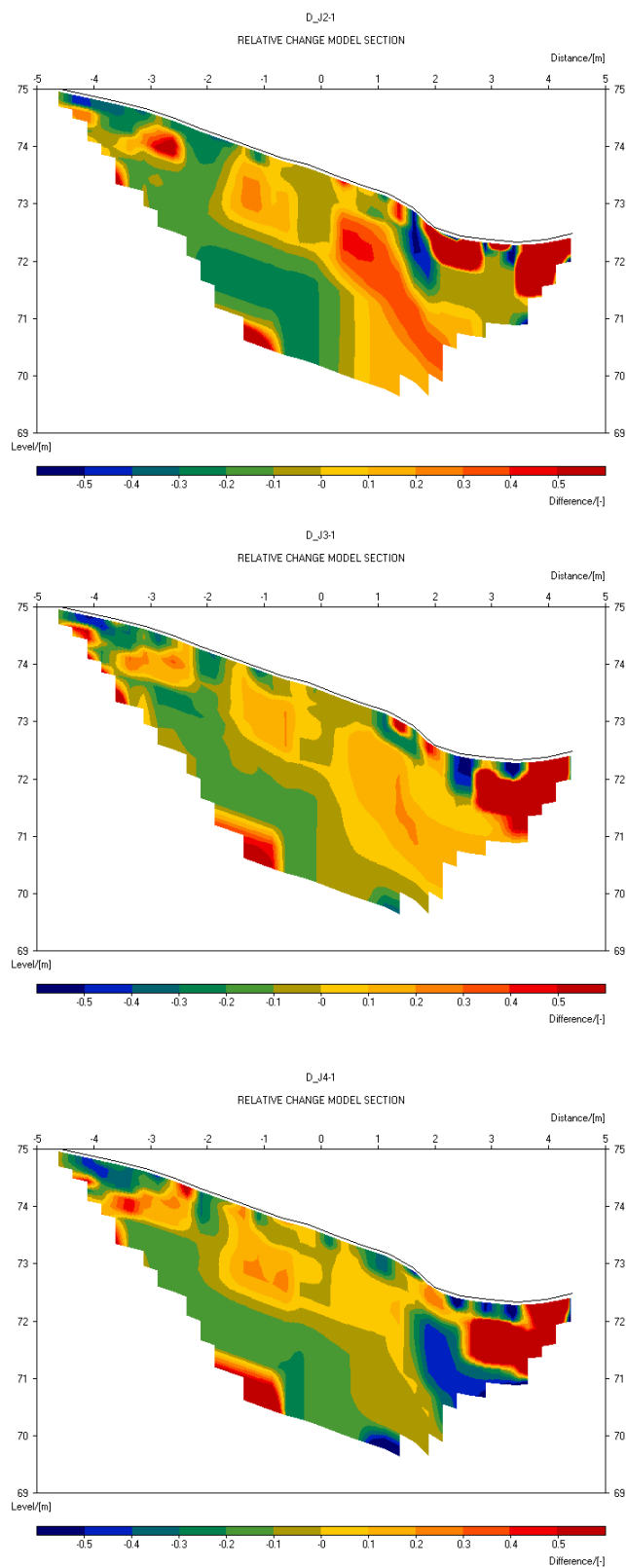
Figur 14.8. Resultat av 3D-resistivitetsmätningar utförda 2007-12-03 presenterade som horisontella 2D-lager. Det översta lagret representerar det ytligaste lagret i markprofilen och figuren nederst det näst ytligaste lagret.

Figur 14.8 visar resultat som lager nära markytan från resistivitetsmätningarna som utfördes 2007-12-03, på samma sätt som figur 14.7 visar sektioner. Varje lager representerar en markvolym parallell med markytan. I figur 14.8 representerar den övre figuren det översta lagret och den undre figuren det näst översta lagret. Resultaten i figur 14.8 och 14.7 representerar sålunda samma mätomgång. I figur 14.8 är zoner med förhöjd resistivitet (över ca 300 Ωm) av speciellt intresse. Sannolikt kan dessa zoner med förhöjd resistivitet tolkas som områden med gasrörelser i de övre delarna av markprofilen.

14.3.2 Resistivitet – relativa skillnader (time lapse inversion)

Så kallad *time lapse inversion* möjliggör tolkning av relativa skillnader mellan mätningar utförda i samma mätlinje, vilket exemplifieras i linje J i figur 14.9. De tre sektionerna i figur 14.9 visar den relativa skillnaden mellan den första mätningen J1 och de tre påföljande mätningarna (jämför tabell 14.2). Samtliga uppmätta sektioner uppvisar en likartad förändring i resistivitet vilket innebär att mätningarna är pålitliga och att mätresultaten utgör en bra grund för tolkning av processerna som sker under markytan.

Stora förändringar i resistivitet syns framför allt vid släntfot där såväl ökningar (gul och röd) som minskningar (blå) syns i figur 14.9. Eftersom förändringarna skedde med endast några timmars mellanrum mellan mätningarna indikeras relativt snabba förlopp i marken. Sannolikt beror de snabba förändringarna på förändringar av gastrycket i markprofilen. Detta gäller framför allt vid släntfot. Såväl ökningar som minskningar av resistivitet anses framför allt bero på förändringar av gastrycket, vilket ger upphov till gasrörelser i marken. Det bör dock påpekas att även processer som vattenrörelser och temperaturförändringar kan påverka resistiviteten.



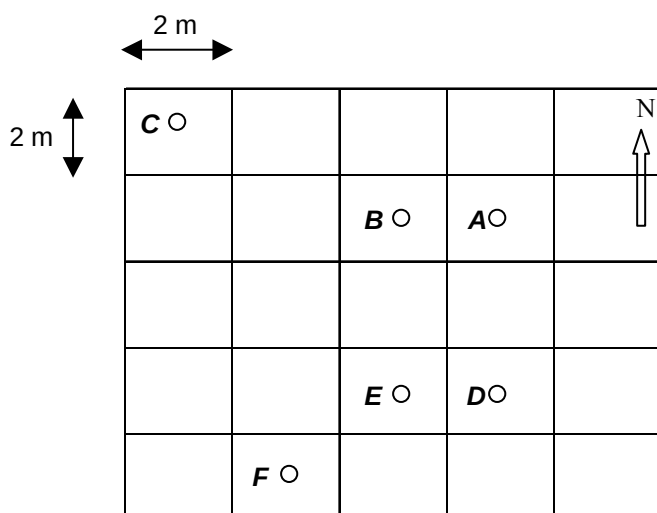
Figur 14.9. Relativa skillnader (time lapse inversion) för de fyra första resistivitetsmätningarna i linje J. Mätningarna utfördes 2007-12-03 och 04, se även tabell 14.5.

14.3.3 Jämförelse mellan mätningar med laser, statisk kammare och resistivitet

Storleken på försöksområdet var tio gånger tio meter. Lasermätningar utfördes i 25 rutor inom området, där varje ruta var två gånger två meter. I varje ruta uppskattades ett medelvärde av utförda lasermätningar. Samtidig mätning med laser och statisk kammare utfördes vid fem tillfällen;

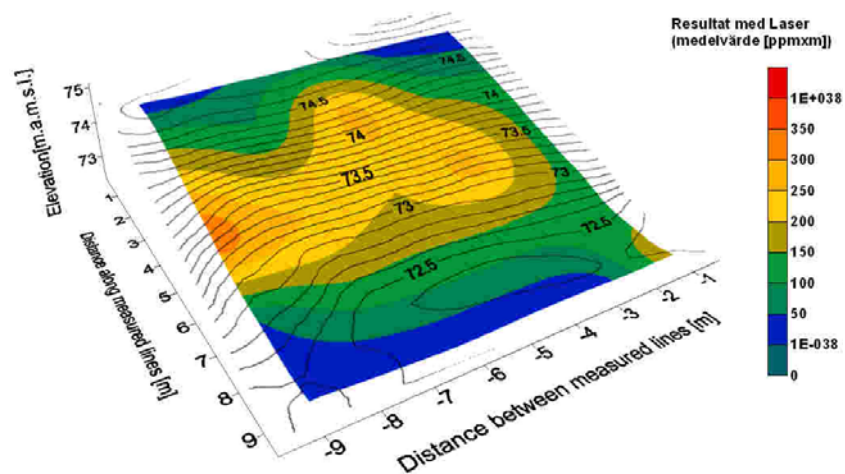
- 2007-12-04 förmiddag
- 2007-12-04 eftermiddag
- 2007-12-05 förmiddag
- 2007-12-05 eftermiddag
- 2007-12-12 eftermiddag.

Statiska kamrar utplacerades slumpvis i sex av de 25 delområdena. I figur 14.10 visas placeringen av de sex kamrarna (A-F).

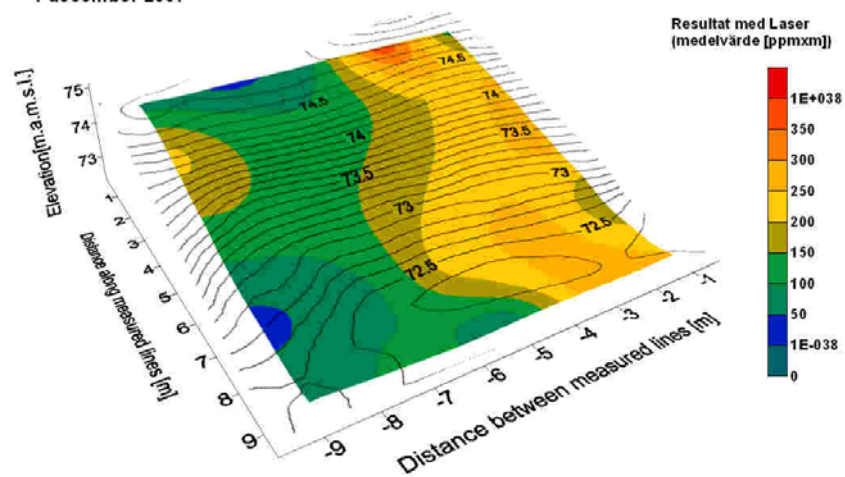


Figur 14.10. En principskiss av de 25 delområdena (två gånger två meter) och placeringen av sex statiska kamrar (A-F).

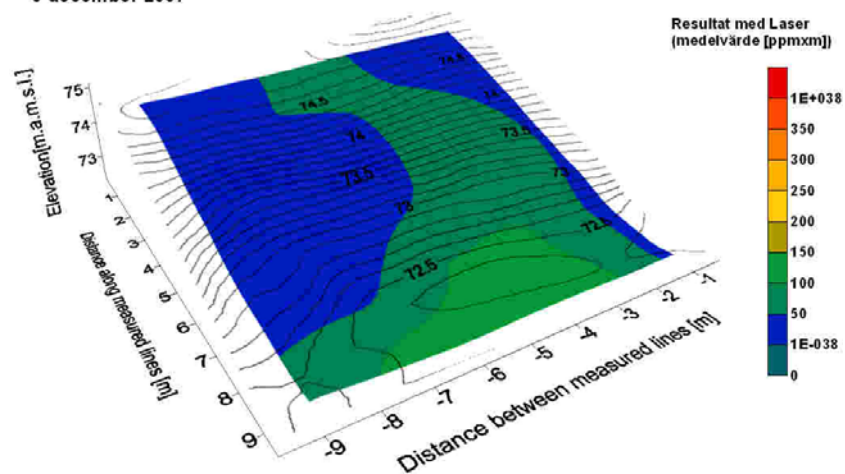
I figur 14.11 visas resultaten av lasermätningarna från 2007-12-04 och 05 som interpolationer av de uppskattade medelvärden som uppmättes i de 25 delområdena. Siffrorna i figur 14.11 markerar topografin (det vill säga, markytans höjd över havet varierade mellan 72,5 och 74,0 m.ö.h). De uppmätta laservärdena varierar mellan mycket låga värden, och upp till ca 300-350 ppm x m. Inga klara mönster eller korrelation till mellan mätningarna kan noteras. Inte heller några korrelationer mellan lasermätningar och resistivetsmätningar kunde noteras. Mätningarna med laser indikerade sålunda inte några gasrörelser vid släntfot på samma sätt som resistiviteten gjorde.



Interpolerade medelvärde med laser (25 medelvärde för 25 kvadrater på 2x2m var)
4 december 2007



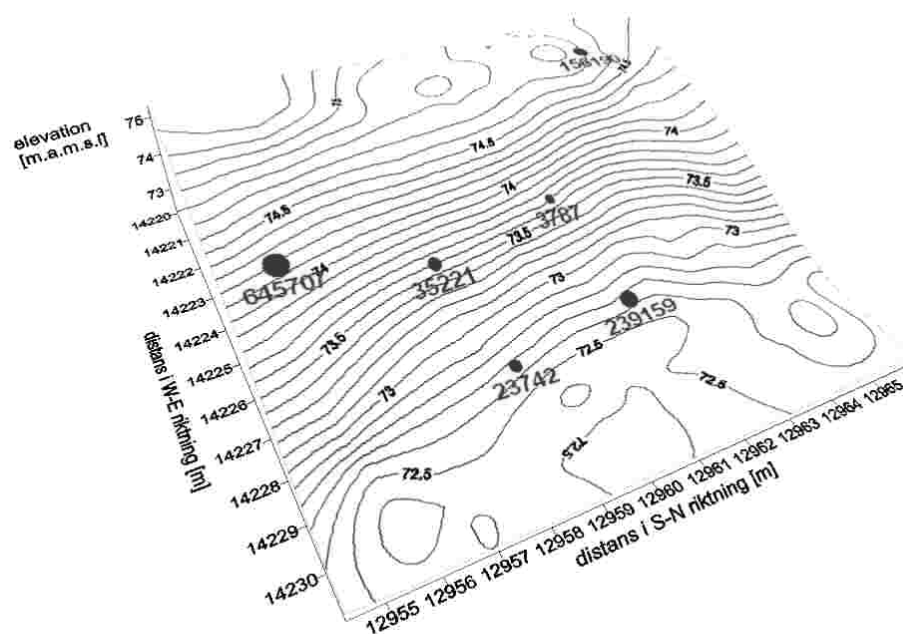
Interpolerade medelvärde med laser (25 medelvärde för 25 kvadrater på 2x2m var)
5 december 2007



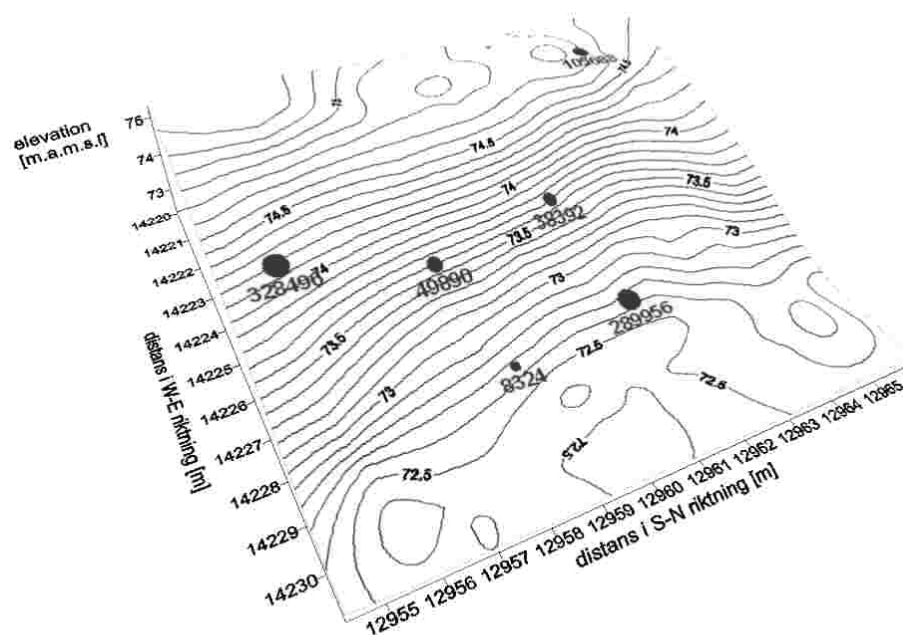
Interpolerade medelvärde med laser (25 medelvärde för 25 kvadrater på 2x2m var)
5 december 2007

Figur 14.11. Lasermätningar utförda den 4, 5 och 12 december 2007. Medelvärde för mätningar i 25 delområden.

För att exemplifiera resultat från mätningar med statisk kammare visas resultaten från mätningarna den 4 december 2007 i figur 14.12. Storleken på prickarna är proportionella med de uppmätta värdena, och siffrorna sidan om prickarna anger de uppmätta värdena.

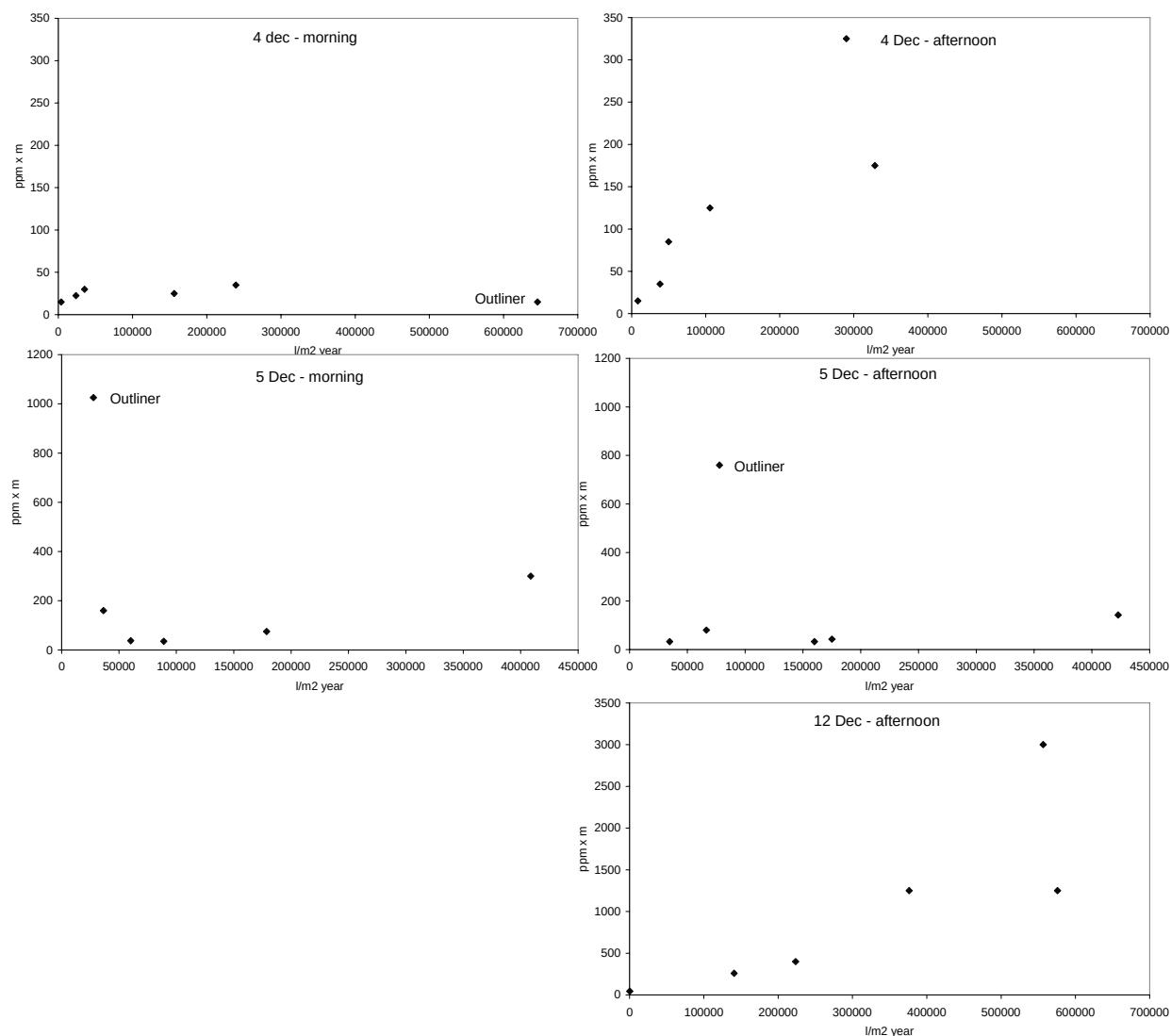


Resultat från kammarmetoden - 4 december 2007 kl. 12.22 [$\text{l/m}^2/\text{år}$]



Resultat från kammarmetoden - 4 december 2007 kl. 16 [$\text{l/m}^2/\text{år}$]

Figur 14.12. Mätningar med statisk kammare den 4 december 2007 utförda klockan 12:22 och 16:00. Storleken på prickarna är proportionella med de uppmätta värdena, och siffrorna sidan om prickarna anger de uppmätta värdena.



Figur 14.13. Samband mellan mätningar med laser och statistik kammare för fem mätningar. Lägg märke till de olika skalorna.

I figur 14.13 och tabellerna 14.3 och 14.4 visar korrelationen mellan mätningar utförda med laser och statistik kammare för de fem mättillfällena. Diagrammen har olika skalor för olika dagar, men mätningar samma dag är plottade mot samma skala. I figur 14.13 framgår det att en viss korrelation mellan mätningar med laser och statistik kammare indikeras. I figur 14.13 och tabell 13.4 indikeras också en viss korrelation mellan mätningar utförda samma dag.

I tabell 14.3 visas korrelationskoefficienterna för mätningarna. Mätningarna uppvisar stora variationer i korrelationskoefficient, mellan -0,27 och 0,85. I tre av mätningarna (4 dec förmiddag, 5 dec förmiddag och 5 dec eftermiddag) finns det en mätpunkt som avviker tydligt från trender som övriga mätningar indikerar. Sådana mätvärden kan benämnas *outliers* och är markerade i figur 14.4. När outliers avlägsnas från mätserierna kan en avsevärt högre korrelation, mellan 0,72 och 0,79, konstateras (tabell 14.3).

Tabell 14.3. Korrelationskoefficienter mellan mätningar med laser och statisk kammare vid fem mättillfällen.

Datum	Tidpunkt	Korrelationskoefficient	Korrelationskoefficient när en "outlier" avlägsnats
2007/12/04	Förmiddag	-0,27	0,72
2007/12/04	Eftermiddag	0,85	0,85
2007/12/05	Förmiddag	-0,15	0,78
2007/12/05	Eftermiddag	-0,16	0,79
2007/12/12	Eftermiddag	0,83	0,83

Mätningar utförda samma dag, förmiddag och eftermiddag, visade relativt höga korrelationer med korrelationskoefficienter mellan 0,55 och 0,98 för lasermätningarna och 0,89 till 0,90 för mätningar med statisk kammare.

Tabell 14.4. Korrelation mellan mätningar utförda samma dag, förmiddag respektive eftermiddag.

	Kammarmetod (l/m ² year)	Laser (ppm x m)
2007/12/04	0,89	0,55
2007/12/05	0,90	0,98

15 RESULTAT AV MÄTNINGAR I FRANKRIKE

15.1 *Beskrivning av mätningar i Frankrike*

Skanning, detektering och kvantifiering med laserinstrument har prövats i full skala för hela deponier vid två deponier i Frankrike. De kallas i rapporten F1 och F2.

Översiktliga data från deponierna finns i kapitel 11 och i bilaga 4. Fältarbetena utfördes i september 2007. Resultaten har redovisats direkt till SITA Environnement i fältrapporter som omfattar beskrivning över mätningarna, ritningar som visar var metanemissioner har detekterats samt tabeller som närmare beskriver emissionspunkterna. I ritningarna har redovisats metanemissioner som detekterats från ytor, och emissioner som härrör från gas-uttagssystem och sprickor i täckskikt.

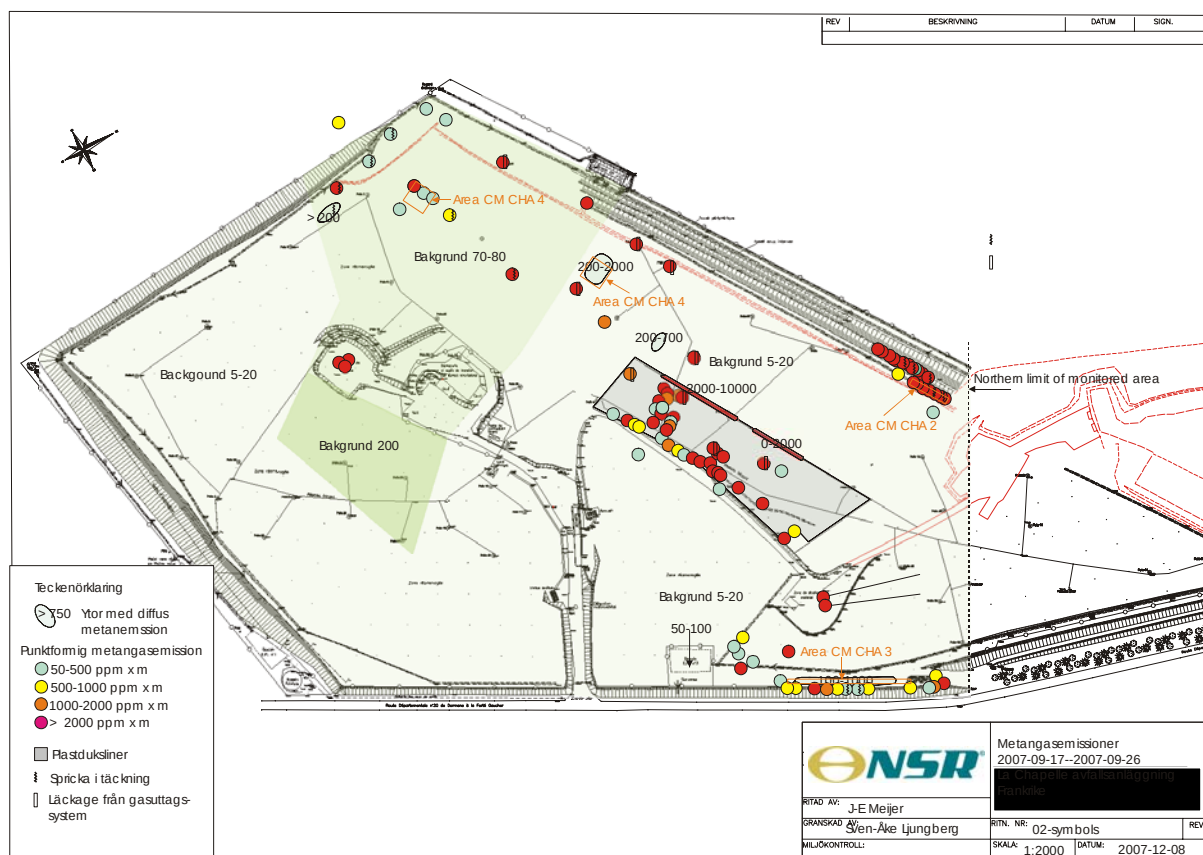
15.1.1 Upplag F1

Mätningar vid F1 utfördes på en yta omfattande 18,7 ha. I denna ingick två etapper, en vilken fylldes med avfall åren 1975-1990 (13,5 ha) samt en etapp som fylldes under åren 1990-2005 (5,2 ha).

Utöver den undersökta delen av deponin finns en ny zon omfattande ungefär 1 ha där avfall deponeras för närvarande.

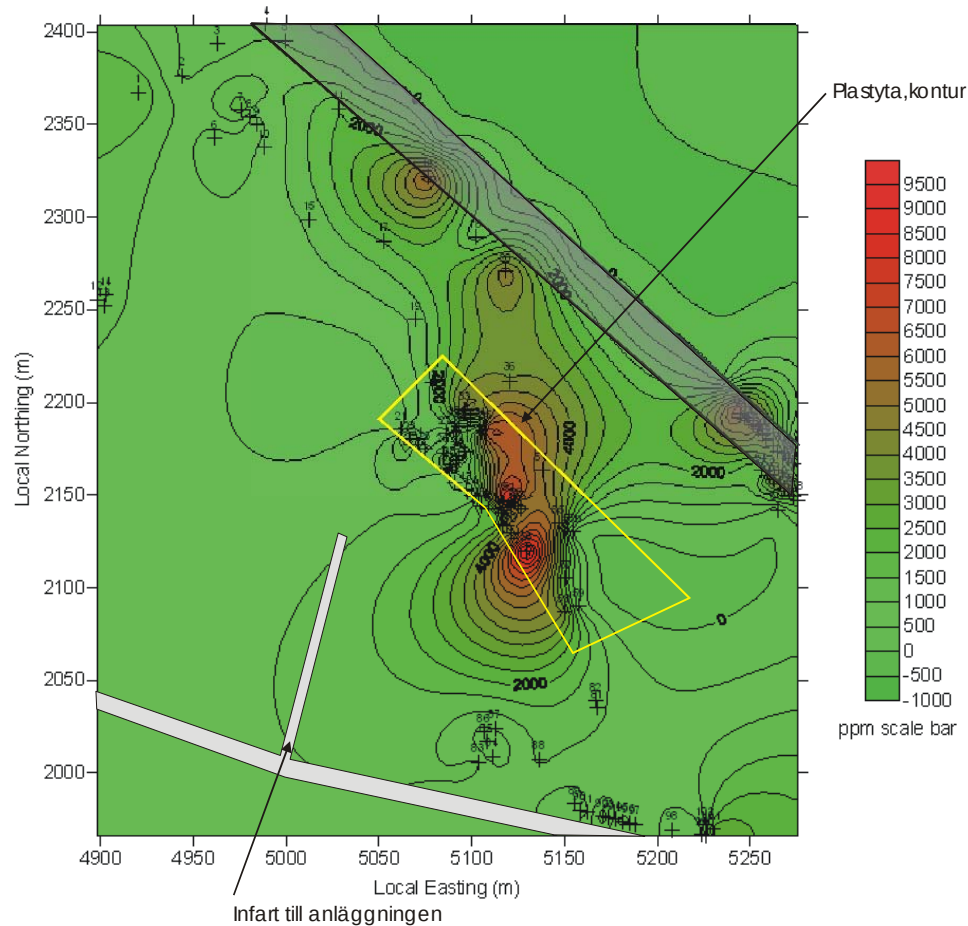
I dagsläget tillförs 80000 ton avfall per år. Andelen hushållsavfall har minskat med åren och utgör i dagsläget ca 40 % av tillfört avfall. Resten är industriavfall. Inom de två första etapperna har beräknats att 760 000 m³ avfall tillförts. Från 1990 fram till 2005 har totalt omkring 675 000 ton deponerats. Totalt inom de delar där mätningar utförts ligger 1,2-1,4 Mton avfall.

Hela ytan som omfattande 16,4 ha kunde skannas på 18 timmar dvs. ungefär 1 ha/tim. I denna tid ingick skanning av en plastyta med många hål och otäta skarvar. Denna del av skanningen var mycket tidskrävande. Släntområden som är tidskrävande omfattar en relativt liten del av upplag F1. Resultatet av skanningen visas i figur 15.1. En 2-D och en 3-D-illustration har också tagits fram, se figur 15.2.

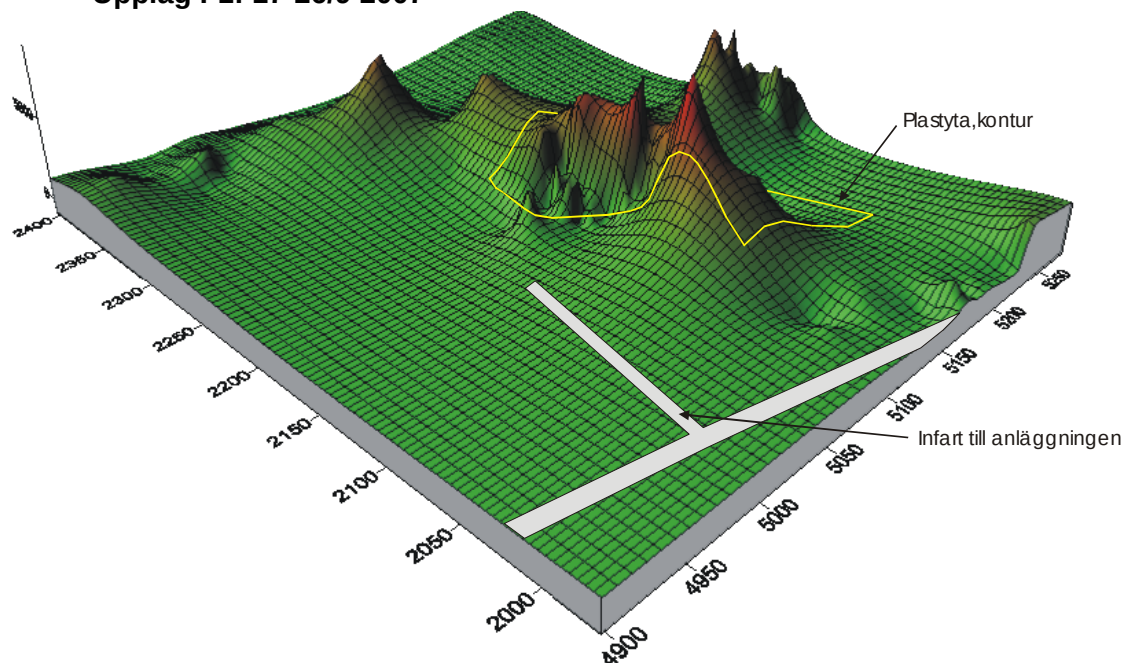


Figur 15.1. Resultat av skanning med laserinstrumentet, upplag F1, se teckenförklaring i figuren.

Upplag F1: 17-26/9 2007



Upplag F1: 17-26/9 2007



Figur 15.2. 2-D och 3-D illustration som visar fördelningen av koncentrationsnivåer och läckageplatser, upplag F1.

Sammanlagt 102 läckagepunkter påträffades med laserinstrumentet och därtill 5 fält med diffust utsläpp. Punkterna fördelades enligt följande tabell 15.1.

Tabell 15.1. Fördelning av läckagetyper, F1.

Typ av metanemission	Antal	Anmärkning
Punktutsläpp, jord	48	
Hål i plastduk	25	
Läckage i plastdukskant eller skarv	9	
Läckage i anslutning till gasbrunnar	9	
Sprickor i täcklager	5	
Läckage från sprickor i betongplatta	5	
Erosion i slänt som skapat bortspolning av täcklager	1	Stort läckage
Summa:	102	

Gasutvinningssystemet vid anläggningen är installerat på hela den undersökta deponidelen. Under 2004 uttogs 1,3 Mm³ deponigas med en medelmetanhalt av cirka 30 %. Under 2006 var medelmetanhalten 35 %. All gas facklas vid anläggningen. Gasutvinningssystemet är troligtvis ej optimerat för maximalt gasuttag då metanhalten troligen sjunker ytterligare om uttaget görs större. Det extensiva uttaget medför att det vid många av gasbrunnarna, eller i anslutning till brunnarna finns gasläckage till atmosfären.

Metanemissionen från överytan sker i huvudsak från deponidelar med färskare avfall. De äldsta delarna av överytorna har inga metanemissioner som registrerats med laserinstrumentet. En deponiyta som täckts med plastduk ligger inom den del av deponin där avfall deponerats 1990-2005 dvs. avfall med hög gasgenerering. Plastduken är en tunn duk, som utgör en intermediär täckning. Plastdukarna är ej svetsade eller limmade samman utan skarvarna är öppna från gasemissionssynpunkt. Sammanlagt 25 läckagepunkter hittades, de flesta direkta punkteringar av plastduken, se exempel figur 12.10-11. Det kunde också konstateras att gas emitterades på många platser från övergången mellan duk och omgivande jordtäckt överyta.

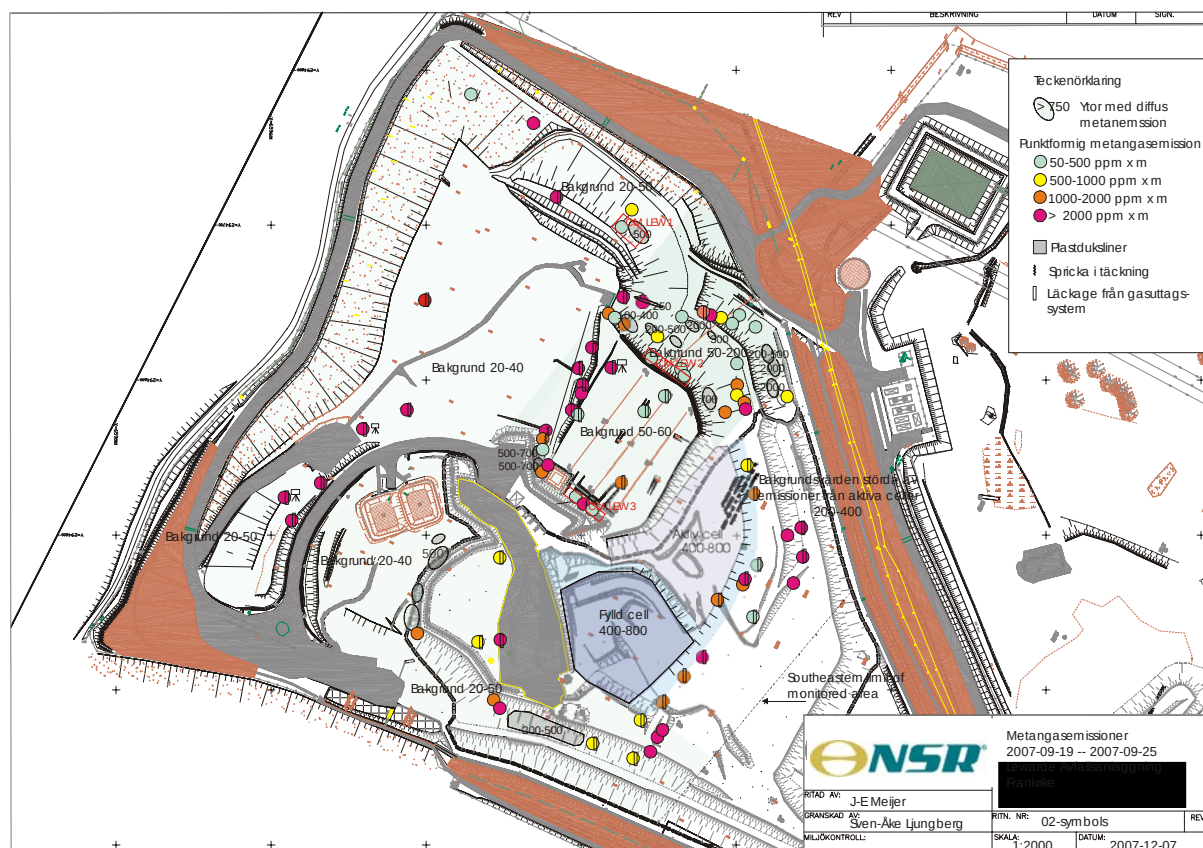
En iakttagelse har gjorts vid mätning av metanemissioner på upplag där det finns delar med gammalt respektive nyare avfall. Deponidelar, med gammalt avfall som har en god täckning med jord, och där det inte förekommer sättningar med sprickbildning i täckmaterialet, upptäcks inte några punktformiga utsläpp av metan. Detta trots att gasuttaget från deponin ej optimerats. Diffus avgång av metan kan förekomma, men inte med höga flöden vilket bekräftats av bl.a. kammarmetodmätningar. Denna typ av yta har den lägsta emissionsnivån av alla ytor på en deponi.

15.1.2 Upplag F2

Mätningar vid F2 utfördes på en yta omfattande 18,5 ha. I denna ingick två etapper, en vilka fylldes med avfall från 1946 till 2001 (12 ha) samt en etapp med aktiv deponering, och som hittills består av 7 celler. Ytan av denna nyare del är 6,5 ha.

I dagsläget tillförs 160 000 ton avfall per år, varav 60 % (96000 ton) är hushållsavfall. Resten är industriavfall. Inom den gamla etappen har det beräknats att 2 Mm³ avfall tillförts. Från 2001 fram till nu har totalt omkring 1 Mm³ deponerats inom den nyare delen. Totalt inom de delar där mätningar utförts ligger cirka 3 Mton avfall. Deponihöjden är 30 m, vilket medfört att andelen slänter är stor, ungefär 50 %.

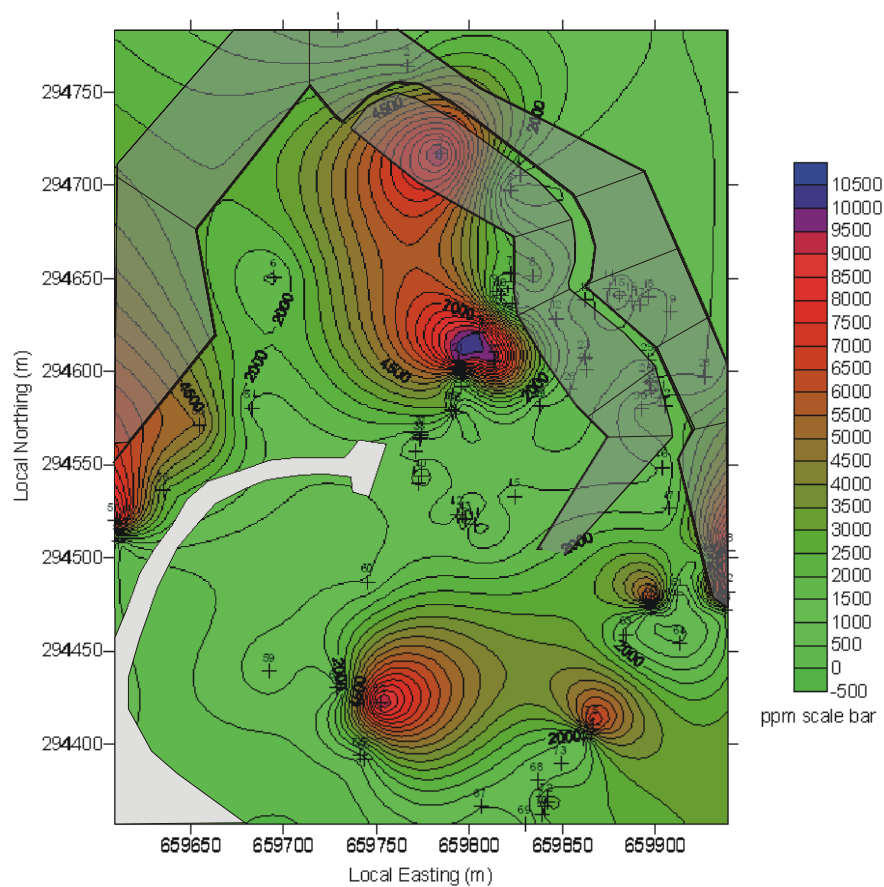
Ytorna på upplag F2 har skannats på samma sätt som vid F1. Denna skanning gjordes med två instrument på 12 timmar, motsvarande 1,3 ha/timme per instrument. Deponins geometri, med stor andel branta slänter samt vegetation på slänterna, medförde att det behövdes en relativt stor arbetsinsats för att skanna alla delar. Resultatet från skanningen framgår av figur 15.3. En 2-D och en 3-D-illustration har också tagits fram, se figur 15.4.



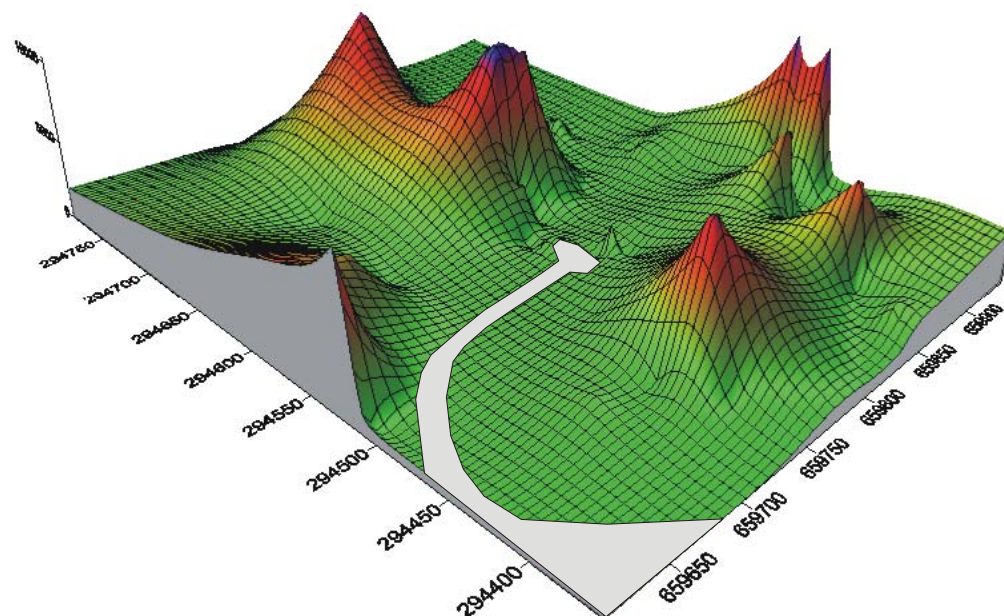
Figur 15.3. Resultat av skanning av deponiytan på upplag F2. Ej skalenlig.

I figuren visas läckageplatser indelade i vilken koncentration som laserinstrumentet registrerat nära utsläppsplatsen. Markering har gjorts som visar om läckaget kommer från synlig spricka i täcksiktet eller om läckaget kommer från platser där läckaget har samband med gasuttagssystemet.

Upplag F2 19-25/9 2007



Upplag F2 19-25/9 2007



Figur 15.4. 2-D och 3-D illustration som visar fördelningen av koncentrationsnivåer och läckageplatser, upplag F2.

Totalt registrerades 75 utsläppspunkter på överytor och slänter och därtill 10 fält med diffus emission av metan. Dessutom konstaterades att de två nyaste cellerna gav upphov till höga koncentrationer inom ett stort område i cellerna och i vindriktningen från dem. Emissionspunkterna kan indelas enligt tabell 15.2.

Tabell 15.2. Fördelning av läckagetyper, upplag F2.

Typ av metanemission	Antal	Anmärkning
Punktutsläpp, jord	38	
Läckage i plastdukskant eller skarv	1	
Läckage i anslutning till gasbrunnar	30	
Sprickor i täcklager	3	
Läckage i slänt	3	
Summa:	75	

Andelen läckagepunkter från gasutvinningssystemet vid upplag F2 är stor. Det kan beräknas att 63 % av punktkläckaget kommer från gasutvinningssystemet inklusive läckage i direkt anslutning till gasbrunnar. Gasuttagssystemet täcker hela deponin och deponigasen används för elproduktion (2 st 1200 kW gasmotorer). Antalet brunnar är 118 st. Under 2006 uttogs 11,3 Mm³ deponigas med en metanhalt på omkring 50 %. Det omfattande läckaget främst kring ledningar och gasbrunnar är förvånande, gasuttaget tycks ej motsvara gasgenereringen. Enligt kompletterande information från SITA Environment, Frankrike var en gasmotor ur funktion vid tidsperioden för våra fältmätningar, vilket förklarar det stora metanläckage som vi registrerat från gasuttagssystemet. Notera att vi med Siemens lasersystem kunde detektera och kartlägga effekter av ett haveri av en gasmotor utan vetskap om händelsen i förväg.

Den äldre delen av upplag F2 har få konstaterade emissionspunkter, och de som upptäckts beror främst på läckage vid gasuttagssystemet (marken runt gasbrunnar). Centralt på deponin har ett fält för infiltration av lakvatten anlagts. Distributionen av lakvatten sker från en damm ut i nedgrävda dräner. Inom fältet samt på slänten nedanför detta fält finns ett stort antal läckagepunkter både från gasuttagssystemet och från överytan. Ett antal fält med diffus avgång av deponigas konstaterades också.

I stort läcker slänterna vid F2 mera än överytorna. Över hälften av de punktformiga utsläppen sker i slänterna. Speciellt vid slänten nedanför infiltrationsfältet finns många utsläppspunkter och emitterande deponiytor. Bearbetningen och täckningen av slänten är här inte helt genomförd, vilket kan bero på att slänten är brant och därför svår att åtgärda.

16 TESTCELLER VID SPILLEPENG

16.1 Allmänt

Testcellerna vid Spillepeng har utgjort en möjlighet att mäta metanläckage från ett område som är väldokumenterat vad avser fysiska förhållanden och avfallsinnehåll.

Testcellerna skapades i ett testprogram inom ett forskningsprojekt som omfattade 12 celler vid tre avfallsanläggningar i Sverige där biogasgenereringen med flera hjälpmedel skulle optimeras. De sex cellerna vid Spillepeng har placerats ovanpå gammalt avfall inom de inre delarna av Spillepengs omfattande deponiområden. De utfördes med botten tätning, lakvattenuppsamling och gasuttagssystem. Därtill har ett mätsystem för temperatur funnits. Totalt 25250 ton avfall lades i cellerna under 1988 och 1989. Cellerna fylldes med delvis olika typer av avfall för att testa avfallssammansättnings inverkan på gasbildningen. Cellerna täcktes med 1,0-1,5 m med jordmassor under 1990.

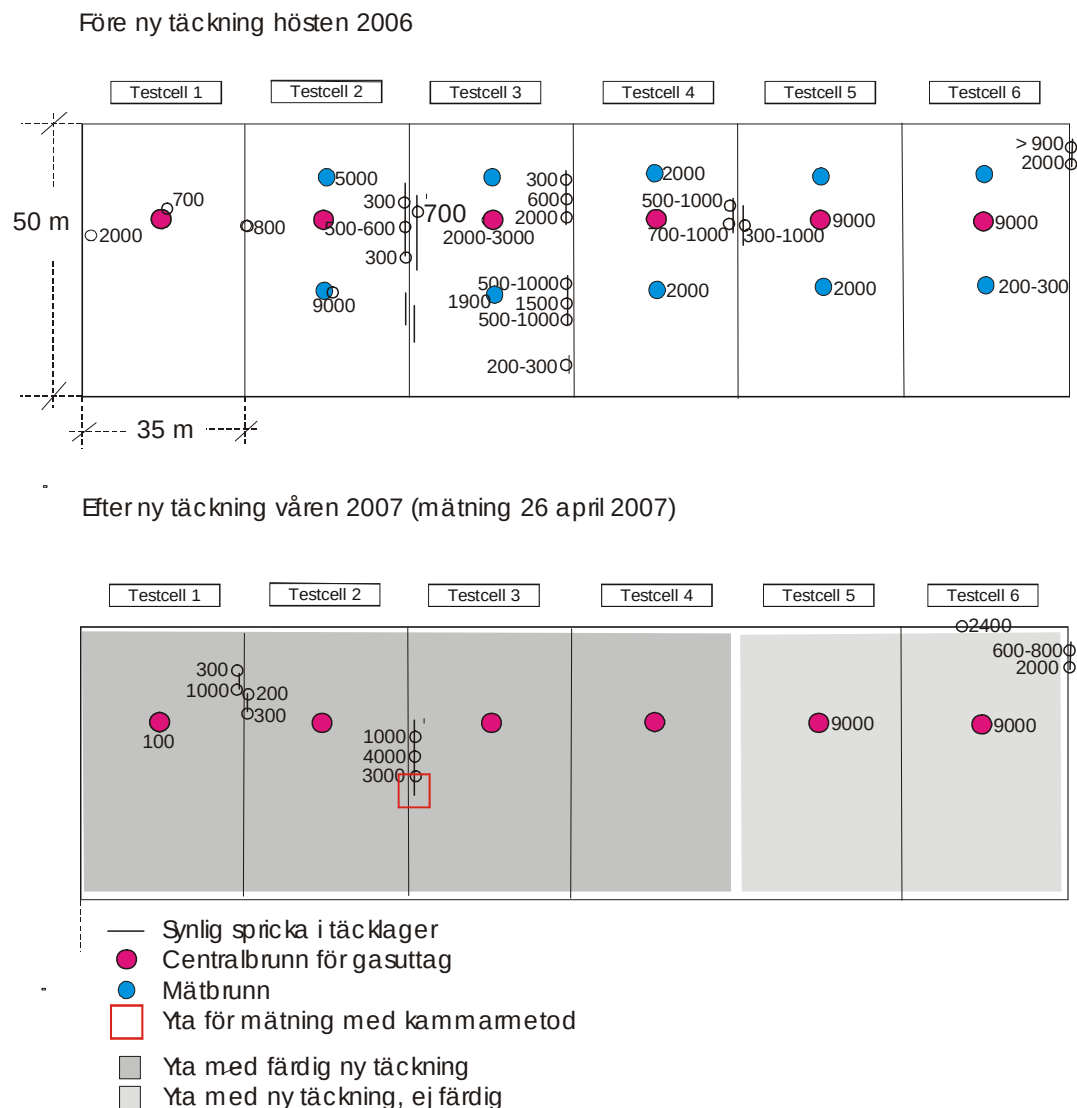
Biogasgenereringen och en mängd andra variabler mättes under åren 1990-1995. Gasgenereringen beräknades till 39-71 m³/ton/år under de fyra undersökta åren.

Sättningarna efter det att forskningsprojektet avslutats har varit mycket stora. Under 2006 stängdes gasuttagssystemet av för att förnyas då sättningarna medfört att stora delar av systemet var försatt ur funktion. Framför allt kunde sprickor ses i ytan i områdena mellan cellerna. Sprickorna var orsakade av stora sättningar just mellan cellerna där vallar mellan cellerna inneburit mindre sättningar än i avfallsvolymererna inne i cellerna.

16.2 Mätningar med laserinstrumentet 2006

I oktober 2006 utfördes en skanning med laserinstrumentet över de sex testcellerna. Metanläckage påträffades vid sprickor i anslutning till cellernas sidokanter samt vid brunnar för gasuttag och mätning. En konsekvens av denna skanning blev att gassystemet renoverades och att ca 1 m nya täckmassor påfördes. Sättningar i cellerna innebar att vattenlås bildats i sugledningarna och vid renoveringen kopplades cellernas gasledningar samman. Det går således ej längre att särskilja om gasen kommer från en viss cell.

En ny skanning utfördes under april 2007 då fyra av cellerna var renoverade men innan testcellerna fem och sex var åtgärdade. Resultaten framgår av figur 16.1.



Figur 16.1. Resultat av lasermätning oktober 2006 samt april 2007, före och efter påförande av ny täckning och restauration av gasuttagssystemet. Siffervärden vid läckageplatserna är angivna i ppm.

16.3 Resultat av täckningsinsatser

Den nya täckningen ger väsentligt mindre läckage än tidigare. Det kan dock noteras att nya sprickor uppträtt i täcklagret. Dessa är som tidigare lokaliserade till cellernas sidokanter indikerande att sättningar fortfarande äger rum. Dessutom belastas cellerna ytterligare av de påförda massorna.

16.4 Kontroll med lasermätning vid avstängt gasuttag

Ett test med lasermätning av gasemissioner från ytor med den nya täckningen gjordes i april 2007 då gasuttaget tillfälligt stängdes av. Det kunde konstateras att utflödet vid de läckagepunkter som hittats, redovisas i figuren 15.2, ökade markant i några punkter men inte alla. Effekten av att gasuttaget upphörde var mycket snabb. Redan efter någon timme inträffade

förhöjningar av metanläckaget. Avstängningen resulterade också i att läckage vid ingående ledningar till reglerhuset kunde detekteras i luften ovan ledningarna (ca 500 - 3000 ppm).

16.5 Mätning med kammarmetod vid testcellerna

Den nya täckningen har kontrollerats med kammarmetodmätning utförd i maj 2007.

Provplatsen innehöll en spricka vars flöde beräknades till 148 m³/år. Laserinstrumentet indikerade ovanför sprickan 3000 ppm. Övrig yta inom provplatsen för kammarmetodmätning gav lägre eller ingen emission på grund av att det fanns en spricka kan en reell uppskattning inte göras av det diffusa gasläckaget från hela testcellsytan.

16.6 Gasbildning och gasuttag i cellerna idag

Efter ombyggnaden av gasuttagssystemet ligger det sammanlagda deponigasflödet stabilt på ca 25 m³/h med en metangashalt på ca 25 % (omräknat 54000 m³ CH₄/år).

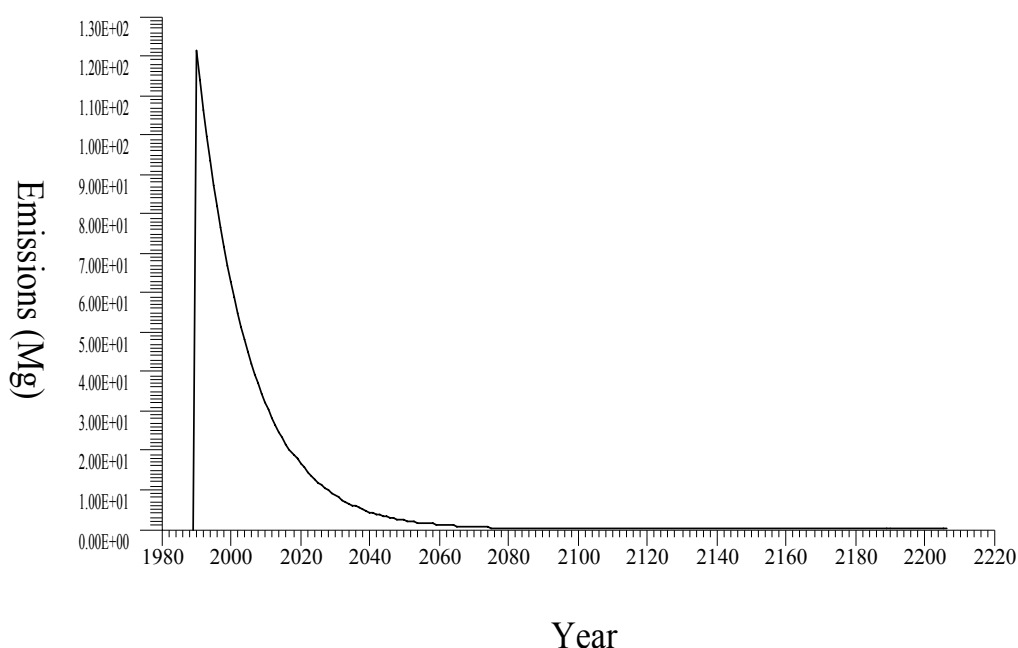
En beräkning med Landgem ger en kurva enligt figur 16.2. Gasbildningen för närvarande skulle med Landgem-kurvan som bas ge ca 56000 m³ CH₄/år. Som grund för beräkning av k-värdet har data rörande avfallsmängd, gaspotential och gasuttag från testcellsprojektet använts.

Inom projektet har bestämning av kvarvarande gaspotential utförts. Resultat framgår av tabell 16.1. I det projekt som dessa celler ingick beräknades den totala gaspotentialen till ca 170 l CH₄/kg TS. Av den ursprungliga gasbildningspotentialen återstår i medeltal ca 14 %. Det framgår dock av tabellen att skillnaderna mellan cellerna är mycket stora. Det som är intressant att notera är att de celler som gav lägre gasutbyte under projekttiden, ca 5 år, är de som nu har högre gaspotential kvar.

Tabell 16.1. Kvarvarande gaspotential i l CH₄/kg TS

Cell nr	l/kg TS
Cell 2	5,6
Cell 3	38,2
Cell 4	48,1
Cell 5	8,9
Cell 6	18,3
MV	23,8

Projected Methane Emissions



Figur 16.2. Förväntad gasbildning vid Spillepengs testceller, Landgem, $k = 0,066$, $Lo = 109$. Y-axeln visar bildningen i ton per år och x-axeln årtal.

17 ANDRA APPLIKATIONER

17.1 Allmänt

Laserinstrumentet kan användas för kontroll av metan på många olika sätt. I det följande ges ett antal exempel. I två exempel används en reflektor i form av en vit skylt belagd med samma reflekterande material som vanliga vägskyltar. Reflektorns storlek är 40 x 75 cm.

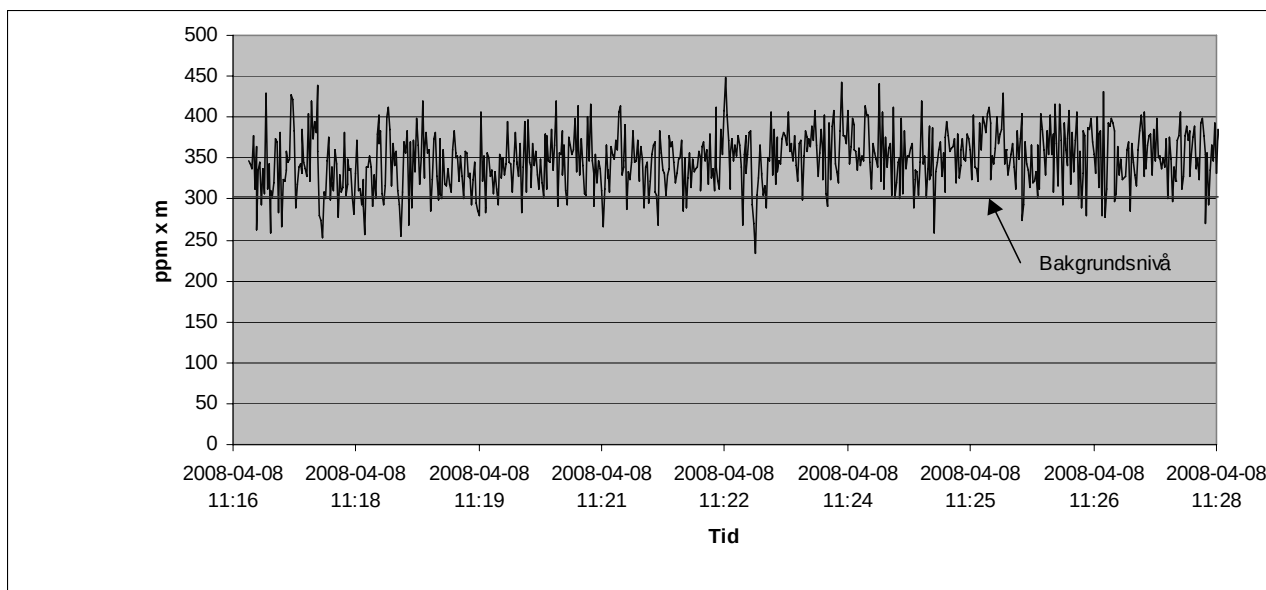
17.2 Mätning med laserinstrument över lakvattendammar

Vid Filborna används dammar för lakvatten för utjämning av flöden före behandling, samt på senare tid också för att kunna utföra förbehandling av lakvattnet genom luftning. Lakvattnet förbehandlas i steg där fyra dammar används i serie, dvs. lakvattnet pumpas från damm 1 till damm 2 osv. Damm 2 har intensivluftning i form av bottenluftare. De tre första dammarna visas i figur 17.1.



Figur 17.1. Situationsskiss över lakvattendammar vid Filborna med mätsträckorna för lasermätningarna inlagda.

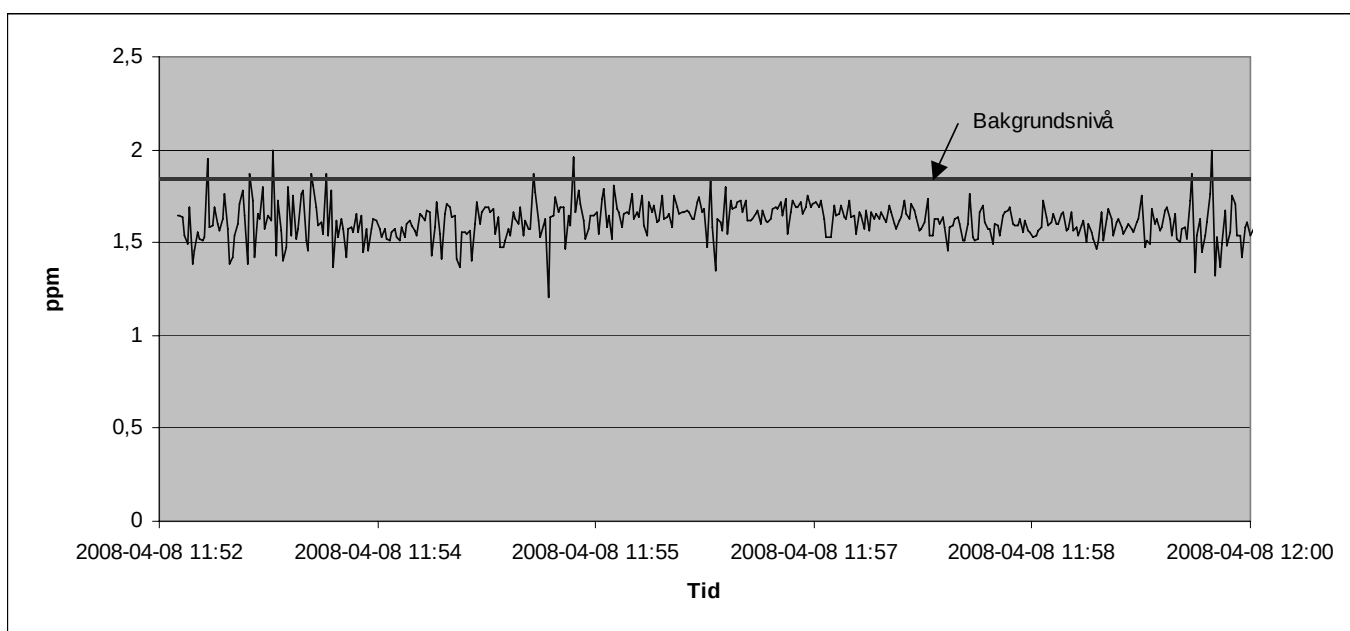
Mätresultat från damm 1 utan luftning, visas i figur 17.2. Vid mätningstillfället rådde mulet väder, vilket möjliggjorde mätning. Det syns dock i figuren att "bruset" är betydande, vilket troligen hänger samman med reflekterat ljus från vattenytan. Mätsträckan över dammen var 85 m och metankoncentrationen blev 348 ppm x m (medelvärde). Bakgrundsnivån blir omräknat 301 ppm x m och gapet mellan 301 och 358 = 57 ppm x m ger att metanhalten över dammen var 0,27 ppm över bakgrundshalten. Det är så små marginaler att troligen skulle fler mätningar ha behövts för att få säker uppfattning om metanhalten vid dammen.



Figur 17.2. Metankoncentrationen över damm 1. Mätsträcka 85 m.

Damm 2 är luftad, i dammen finns bottenluftare installerade. Mätsträcka ca 72 m (uppskattad), medelvärde 232 ppm x m eller 1,61 ppm. Här ligger mätvärdet i instrumentet *under* bakgrunds nivån, som framgår av figur 17.3.

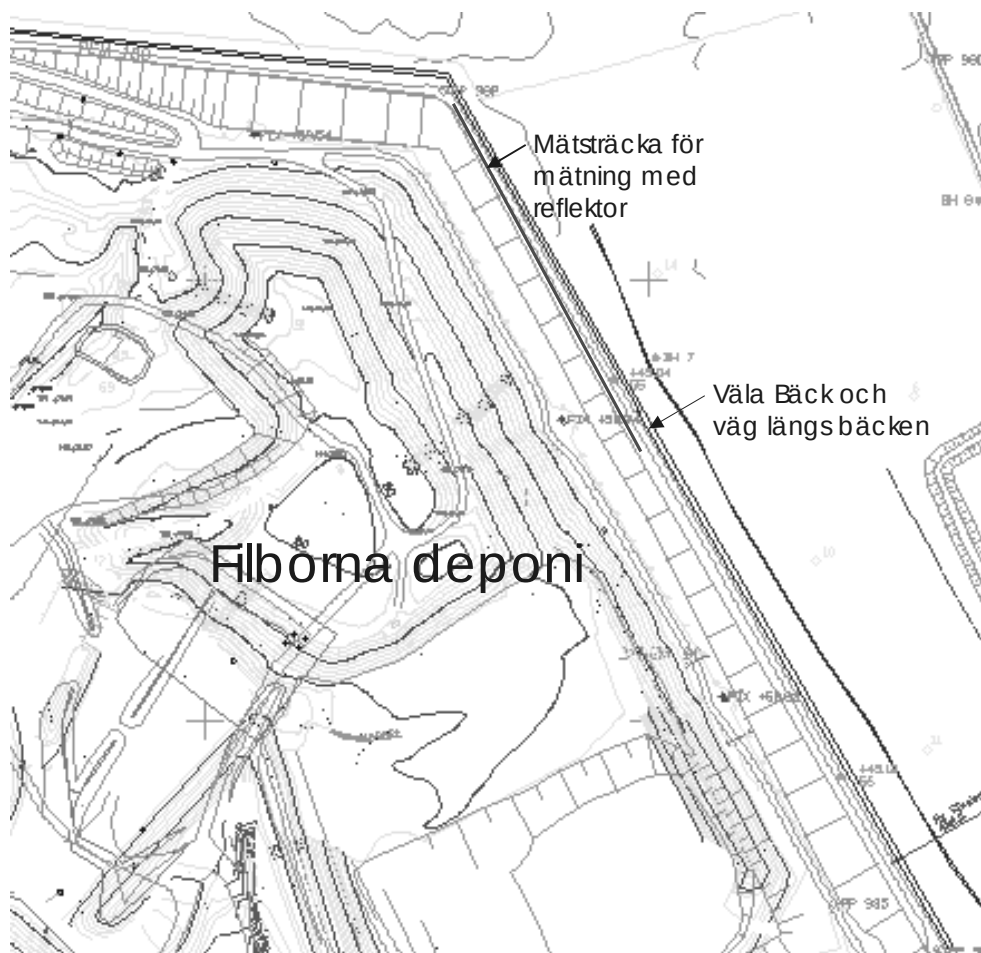
En metankoncentration över den luftade dammen som är lägre än den generella bakgrunds nivån är faktiskt möjlig. Luftning kan sänka metanhalten i den luft som används genom metanoxiderande bakterier i dammen (Börjesson, 2008). Bakterierna tar alltså hand om atmosfäriskt metan. Detta har setts tidigare i deponiers ytskikt. Flera mätningar behövs för att säkerställa förhållandet.



Figur 17.3. Metankoncentrationen över den luftade dammen. Mätsträcka 72 m.

17.3 Mätning längs Väla Bäck, Filborna

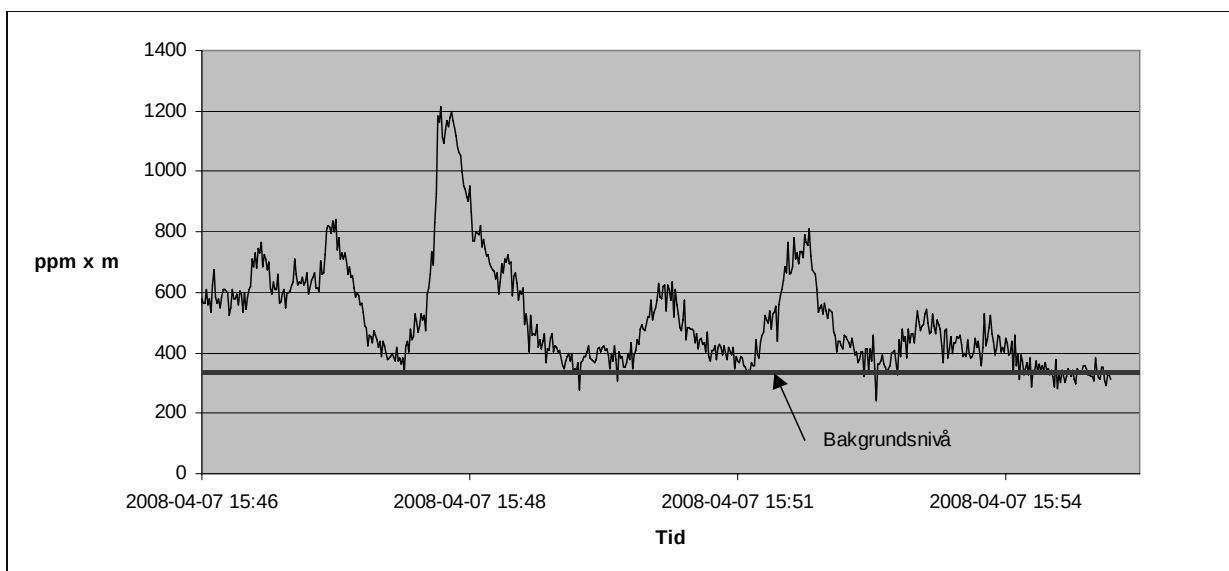
Vid sidan av den stora deponi vid Filborna finns en väg samt en mindre bäck, Välabäcken. Mot bäcken bildar deponin en brant slänt som är över 30 m hög (figur 17.4).



Figur 17.4. Situationsskiss över område för mätning med laserinstrumentet längs Väla Bäck.

I april 2008 utfördes mätning med reflektor längs bäcken för att se hur lång räckvidd laserinstrumentet har då en bakåtstrålande yta (backskatteryta) i form av ett reflekterande material (vägskylt) används. Mätningen utfördes under dagtid med soligt väder. Mätplatsen var belägen i skugga, enstaka solstrålar kunde leta sig ned genom tät vegetation.

I figur 17.5 visas mätning med reflektorn på 100 m avstånd. Som längst kunde mätning utföras på 200 m avstånd. I figuren ses, trots mätning under dagtid, att bruset från inkommande ljus är litet. I figuren ses också att metan från den närbelägna deponin med vinden (västlig vind) förs förbi strålgången mellan reflektorn och laserinstrumentet.



Figur 17.5. Mätning mot reflektor längs Väla Bäck, Filborna. Mätsträcka 100 m.

17.4 Mätningar från utgrävning av gammalt avfall

Under 2008 grävs en gammal kommunal deponi med blandat hushållsavfall och industriavfall ut i centrala Helsingborg, kallad Ringstorpsdeponin. Deponin var i drift mellan åren 1930 och 1950 och allt avfall är från denna tid. Avfallet grävs bort och forslas till Filborna för slutlig deponering vid en kontrollerad deponi. Sammanlagt grävs ut och flyttas ca 160 000 m³ avfall. Under utgrävningen har laserinstrumentet använts för att se om deponigas fortfarande finns i avfallet. Det kan sägas att några läckage vid ytan inte kunnat spåras.

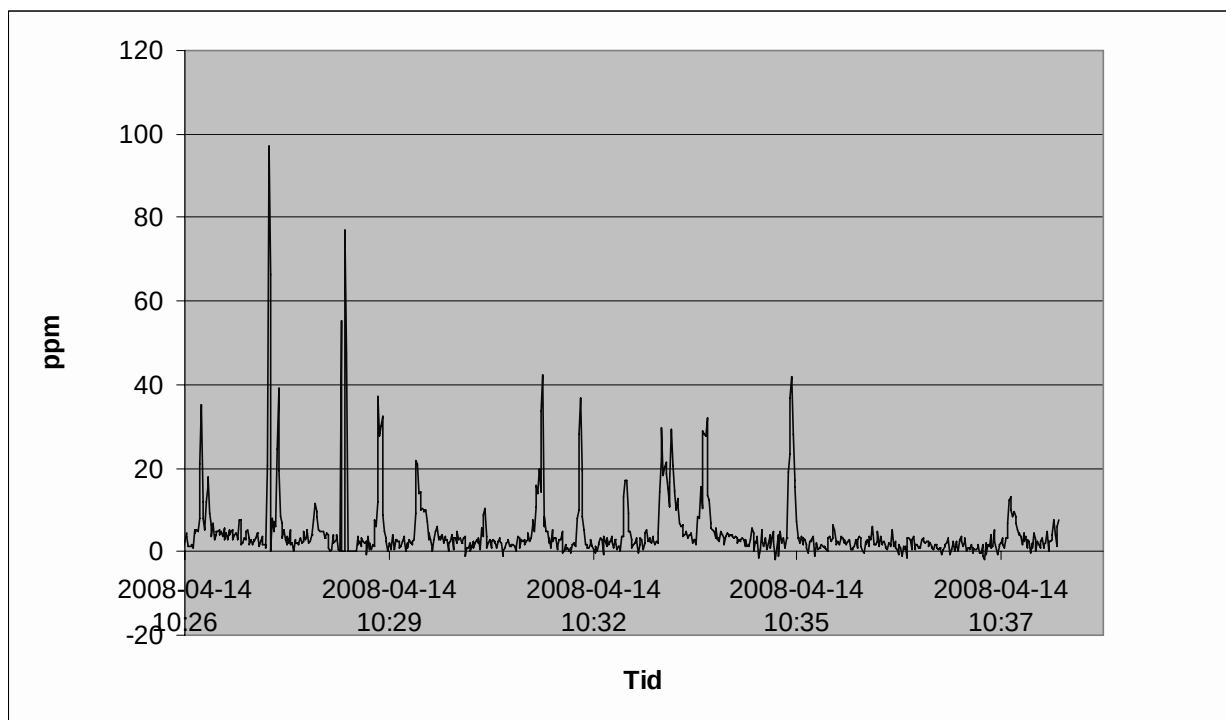
Laserinstrumentet ställdes upp riktat mot avfallet, där utgrävning just pågick. Avståndet till avfallsytan var 12 m. Uppställning och förhållandena på platsen framgår av figur 17.6. I figur 17.7 visas metankoncentrationen i ppm vid utgrävningsplatsen. Det syns tydligt hur metankoncentrationen ökar markant varje gång grävmaskinen för skopan i utgrävningsområdet för att lyfta avfallet upp i lastbilen.

Det finns således en pågående nedbrytning av avfallet som ger upphov till deponigas. Genereringen är troligen liten, vilket också framgår av att koncentrationerna nära branten där utgrävningen sker sjunker direkt efter det att grävskopan fyllt skopan och förs upp för att lossa avfallet i lastbilen.

I detta fall kunde inte reflektor användas då solljuset var för starkt. Bästa mätförhållanden erhöles genom att rikta laserinstrumentet rakt in mot avfallsbranten och använda denna som backskatteryta. Brus finns och kan till del bero på att glasbitar etc. i avfallet kastar in oönskat ljus mot instrumentet.



Figur 17.6. Utgrävning av avfall vid Ringstorpsdeponin, Helsingborg 2008. På bilden visas uppställningen av laserinstrumentet riktat mot grävningsplatsen.



Figur 17.7. Metankoncentrationen i ppm vid utgrävning av Ringstorpsdeponin.

18 ANALYS OCH UTVÄRDERING

18.1 *Instrumentens möjligheter och begränsningar*

Siemens lasersystem är utvecklad för att detektera och kartlägga gasläckage från distributions-system för naturgas lokaliserad under och ovan mark. Utvecklingsarbetet har skett inom ramen för ett EU-finansierat FoU-projekt i samarbete mellan en internationell forskargrupp och slutanvändare inom gasdistributionsbranschen. Teknisk specifikation och operativ utformning av Siemens lasersystem har utarbetats enligt krav och önskemål framställda av slutanvändarna. I arbetet framtogs även krav och önskemål för användning vid avfallsdeponier.

Internationella säkerhetsföreskrifter för gasdistribution av naturgas anger normer och gränsvärden för när gasdistributören är skyldig att åtgärda indikerad emission av metanläckage från gasdistributionssystem. Bakgrundsemissionen för metangas är 1,77 ppm. Slutanvändarna för naturgasdistribution har angivit 10-20 ppm som ett operativt värde som riktlinje för indikation på förhöjd gasemission. Naturgasdistributörerna har i likhet med linjeinspektion av högspänningsledningar skyldighet att inom ramen för ett planlagt program för förebyggande kontroll och underhåll besiktiga gasledningsystem inom fastställda intervall och åtgärda indikerade gasläckage. För användning ute på avfallsdeponier finns inte några uppsatta riktvärden, men den snabba omblandningen av utläckande metan i luften ovan en deponi, innebär att ett instrument med hög känslighet måste användas. Siemensinstrumentet har för detektering av metanläckage på deponiytor tillräckligt låg detektionsgräns och tillräcklig snabbhet.

Siemens har utvecklat 3 prototyper av lasersystemet varav två har använts inom projektet. Siemens lasersystem mäter koncentrationen av metangas i ppm x m. Lasern är en s.k. infraröd laser som opererar inom våglängdsområdet 1651 nm. Nedre gränsen för detekterbar metan är 10-20 ppm x m beroende på hur mycket återreflekterad energi som returneras från den bakåtskrållande ytan (backskatterytan). Räckvidden på lasern är 10-30 m beroende på backskatterytans reflekterande egenskaper. Lasersystemet mäter och registrerar 10 mätvärden per sekund.

FLIR System AB har utvecklat en ThermoCAM™ GasFindIR LW IR som använts inom projektet som komplement till fältmätning med Siemens lasersystem. GasFindersystemet arbetar inom spektralområdet 10-11 µm, och är utrustad med en Focal Plane Array (FPA), QWIP, 320x240 pixels detektor. FLIR IR-GasFinder är konstruerad för att detektera och visualisera en rad olika gaser inklusive metangas från avfallsupplag, naturgas från ledningsbundna system lokaliserade under och ovan mark, gasturbiner, gastankstationer etc. Värmebildsdata presenteras i realtid på en bärbar, fältanpassad displayenhet, och lagras digitalt på en liten bärbar DVD-enhet. GasFindersystemet kan användas för att detektera, visualisera och följa gasens spridningsbild och kartlägga gasläckage, men kan inte användas för att kvantifiera gasflöden. I likhet med alla IR-system är IR-GasFindersystemet temperaturberoende. Resultat från fältförsök som utförts inom projektet indikerar att man behöver ha en metangaskoncentration på ≥ 1000 ppm x m och en temperaturskillnad mellan metangasen och omgivningen på ≥ 2 °C för att kunna detektera och visualisera metanemissioner, beroende på vindhastighet, utstrålningsförhållanden etc.

Redovisningen nedan skall ses som en sammanfattande analys och utvärdering av de iakttagelser och resultat från fältmätningarna utförda inom projektet, och de resultat som finns redovisade i refererad forskningslitteratur. Problemställningen kring klarheter och oklarheter om metanbildningsprocessen i en deponi, transmitteringsprocessen av gas genom deponimassan, faktorer som påverkar metanemissionen från en deponiyta, och möjligheten att mäta och registrera metanemissioner på ett adekvat sätt analyseras och utvärderas nedan.

ppm är ett koncentrationsmått och l/min är ett flödesmått, dvs. de är två helt skilda måttenheter. Det är svårt att omvandla ppm-mått till flödesmått, därtill behövs bl.a. ett operativt säkert sätt att bestämma flödes hastigheten vid mättidpunkten, och det är förmodligen också nödvändigt att ha en referenslaser eller referens-gascell inbyggd i lasersystemet.

Vid detektering används laserinstrumentets registrering av metankoncentrationen längs en strålgång för att påvisa läckage uttryckt i ppm x m. Metoden är snabb och den yttäckande karteringen har lika stor noggrannhet som t.ex. FID-metoden, vilket karteringen av deponin F1 visat. Läckage som upptäcks består framför allt av punktläckage, men områden med diffusa metanläckage över ytor kan också detekteras. Påfallande många läckagekällor har också påträffats vid gasbrunnar och gasledning ut på deponierna.

Detektering sker som en korttidsmätning, dvs. alla utsläppsförhållanden vid den aktuella deponin blir inte registrerade vid ett och samma mättillfälle och karteringen blir en "ögonblicksbild". Mätresultat från upprepade fältmätningar visar att samma läckageplatser kan ge höga koncentrationsnivåer vid en tidpunkt och låga vid en annan tidpunkt. Generellt kan dock sägas att områden med ett stort antal läckagepunkter utgör platser som först och främst bör bevakas, och nya mätningar göras. Åtgärder bör sättas in om läckagen återfinns vid flera mättillfällen.

De fem kombinerade mätningar med laserinstrument och kammarmetod på exakt samma sätt inom en och samma yta under en tidsrymd av 10 dagar vid Filborna är ett illustrativt exempel på hur stora variationer en och samma yta kan uppvisa vid olika tidpunkter.

Metangas bildas nere i deponin och ett tryck byggs upp. Vid ett visst tryck transmitteras metangasen den lättaste vägen genom deponimassan upp till och emitterar genom ytskiktet via (a) hål, (b) sprickor och (c) genom diffus avgång via genomsläppligt deponi/täckmaterial.

Flödet/flödena ut från en deponi är inte konstanta utan kan pulsera i intervaller med max- och minflöden och det kan förekomma intervaller med inga mätbara flöden alls.

Även om det är tekniskt möjligt att utveckla ett system för detektering och kvantifiering av metanflöden i l/min så kvarstår frågan om vad det är man mäter, och om mätdata från en mättidpunkt är representativ och kan användas för att generalisera metanemissionen för den aktuella deponiytan, på årsbasis.

I litteraturen redovisas resultat från studier där man mäter metanemissioner med olika typer markbaserad laser/metoder i avstånd på 100-1000 m strålgång. Det är naturligtvis så att även dessa metoder vanligtvis "fryser en ögonblicksbild" som sedan generaliseras till ett årsvärde eller någon annan måttenhet.

Kammarmetoden har samma begränsning som övrig existerande teknik och mätmetoder, att träffa rätt i tidscykeln, eller snarare att mäta tillräckligt många gånger under en slumpmässigt

framtagen tidscykel för att fånga in representativa sekvenser av max- och minflöden av gasemissioner.

Resonemanget visar generellt behovet av återkommande mätningar för att kunna öka noggrannheten vid beräkning av metanflöde från en hel eller från representativa delar av en deponi.

Resultat från fältmätning inom projektet indikerar att mätning med laser, för detektering och kartläggning av metanemissioner från deponiytor, sannolikt inkluderar emissionsbidrag från omgivande deponiytor. Den mätning som utförts vid Väla Bäck, Filbornadeponin (avsnitt 17.3) illustrerar emissionsbidragens påverkan. Problemet skall dock inte överbetonas. Det är främst vid skanning det föreligger risk för att lasern registrerar luftburna emissionsbidrag, men vid senare detaljerad inmätning minimeras detta fel.

Vare sig man mäter med ett lasersystem som integrerar emissioner utmed en lång mätsträcka/strålgång, eller mäter direkt 2-4 dm mot en läckagekälla med ett Siemens lasersystem så kvarstår problemet med den i tidsintervaller pulserande gasemissionen. Dessutom måste beaktas den relativt snabba omblandningen av metangasen med omgivande luft. Detta medför att även vid höga flöden så varierar gaskoncentrationen och kan även under en mycket kort mätperiod på $\leq 5-10$ sekunder ge stora variationer i uppmätta ppm-värden, illustrerat i figurerna 12.6, 12.21/22 och 12.25.

Vid fältlaborativa mätningar med simulering av kända metanflöden konstaterades att den uppmätta metankoncentrationen varierade mycket lite vid lasermätning med olika flöden. Hur tolkar man det resultatet? Metangasen är en flyktig gas som påverkas även vid låga vindhastigheter och små temperaturskillnader mellan gas och omgivande atmosfär, vilket medför en mycket snabb omblandning av metangasen med omgivande luft.

Resultat från fältmätningar inom projektet och resultat redovisade i den internationella FoU-litteraturen indikerar att det skulle vara möjligt att med existerande teknik i kombination med kompletterande och systematiskt utförda fältreferensmätningar öka träffsäkerheten och användbarheten av fjärranalysdata för kartläggning och indirekt kvantifiering av gasemissioner från avfallsupplag.

I projektet har kammarmetoden använts för att försöka kvantifiera utläckaget som detekterats med laserinstrumentet. Om alla individuella mätvärden med kammarmetoden ställs mot motsvarande mätvärden för laserinstrumentet erhålls ett samband. Det går på detta sätt att erhålla kvantitativa mått på utläckaget. Den stora svårigheten är att det inte utan stora insatser går att verifiera resultatet. Motsvarande samband erhöles i ett fältlaborativt test där en sandlåda med känd kontrollerad metanemission användes. Vid testet visade sig kammarmetodens mätvärden kan avvika från det kända flödet vid stor simulerad emission, indikerande att kammarmetoden som mätmetod har begränsningar.

Sambandet mellan mätvärdena från laser- respektive kammarmetodmätningar har använts för att försöka kvantifiera utsläppen vid de franska upplagen F1 och F2. De sammanlagda emissionerna från de två deponierna har uppskattats till 41 respektive 30 ton metan per år. De registrerade kvantifierade metanutsläppen från detekterade punkter är små i förhållande till de emissioner som redovisas av deponiägaren. Förhållandet ger dock en fingervisning om att den diffusa avgången av metan från deponierna är den dominerande, och inte de punktvisa som sker genom hål, sprickor etc.

En tredje kategori av metanmission är de från de stora utsläppspunkterna. Vid deponierna F1 och F2 fanns framför allt vid gasuttagssystemets ledningar och brunnar mycket stora utsläpp som blir klart undervärderade vid en enskild skanning. De representerar stora läckage som inte kan uppmätas och flödesberäknas genom kombinationen laserinstrument och kammarmetod.

En annan beräkning har gjorts vid presentationen av metanemissionerna inom överytor och slänter. Inom varje provyta har medelvärden för laserinstrumentet och kammarmetoden använts. För både överytor och slänter var korrelationen mycket god. Från resultaten kan utläsas att slänter i medeltal avger 5-10 gånger större emissioner, vilket också styrks av andra undersökningar. I dessa undersökningar, med ett relativt litet antal observationer, har ett högt värdepar stor betydelse. Det kan också fastslås att förekomsten av läckagepunkter är större i slänter än inom överytor.

Mätningarna från överytor och slänter visar att deponiålder, vid sidan av deponigassystemets effektivitet, har stor betydelse. Upplagsdelar med högre ålder än 15 år påvisar betydligt lägre emissioner.

Uppdelningen i typytor har varit ett bra hjälpmedel för att förstå metanemissionernas art och lokalisering. Den riskindelning som uppgjorts från början har visat sig vara tillämpbar. Olika deponier har stora differenser i kvoten överyta/slänt.

I projektet har laserinstrumentet använts för att klassificera typytor, där sedan kammarmetoden använts för att bestämma metanläckaget för de olika typerna av ytor som laserinstrumentet klassificerat. Det går på detta sätt att indirekt erhålla kvantitativa mått på utläckaget. Indelningen i typytor gjordes på ett tidigt stadium i projektet. Tillvägagångssättet har använts för att beräkna metanemissionen från de franska deponierna F1 och F2. Resultaten är rimliga, men skiljer sig från de som deponiägaren själv angivit.

Om målet är att finna ett säkert mått på utläckage från en deponi är det högst troligt att kombinationen av lasermätning tillsammans med kammarmetoden inte har tillräcklig noggrannhet för kvantitativ säker bestämning av metanemissioner. Om målet t ex. istället är att prioritera och bestämma var åtgärder bör sättas in för olika deponiytor för att minska utläckagen är troligen kombinationen av laser och kammarmetoden användbar.

Ett bra exempel av laserinstrumentets användbarhet utfördes vid testcellerna vid Spillepeng. En skanning användes här för att ta fram underlag för genomförande av kompletterande täckingsåtgärder på cellerna. Resultatet kunde kontrolleras på plats och i detta fall även användas som underlag för kontrollberäkning av förväntade deponigasmängder relaterat till det faktiska uttaget.

Slutligen kunde i projektet demonstreras hur laserinstrumentet kan användas med mätning mot en reflektor av enkelt slag. Mätning med en strålgångslängd upp till 200 m är möjlig. Exempel på tillämpning är mätning över lakvattendammar, vid sidan av en deponi samt på delar av en deponi. Sådana mätningar kan ge viktig information om emissionsförhållanden, svåra att erhålla på annat sätt.

18.2 *Faktorer som påverkar laser- och IR-mätning av metanemissioner*

Redovisningen här begränsas till en beskrivning och försök till förklaring av sådana faktorer som påverkar metanemissionerna och möjligheterna att med hjälp av modern fjärranalys-teknik, typ laser- och högupplösande IR-teknik detektera, mäta och visualisera metangas som emitteras från en avfallsdeponi.

Resultaten från den första serien av laserbaserade fältmätningar av metanemissioner från avfallsdeponier som utfördes höstsäsongen 2006 formerade en bas av mätresultat som efter tolkning och analys bildade grunden i fältmätprogrammen för de efterföljande fältmätningarna under vinter-, vår och sommarsäsongen. Notera att väder- och utstrålningsförhållanden kan variera kraftigt beroende på var i Sverige avfallsdeponin är lokaliserad. Detta gäller speciellt under höst-, vinter respektive vårsäsongen. Sommarsäsongen kan ibland ge lika väder- och utstrålningsförhållanden över hela Sverige.

Parallellt med fältmätning med Siemens lasersystem och FLIRs IR-GasFinder utfördes mätning av kompletterande fältreferensdata enligt metoder redovisade i kapitel 10.1 (figurer 10.1, 10.2 och 10.3). Syftet med mätning av fältreferensdata var att studera och försöka förklara vilken påverkan på metanbildningsprocessen, gasdistributionen och gasflöde som sker vid olika väder- och utstrålningsparametrar. Tolkning och analys av kombinationen laser-, IR och fältreferensdata indikerar att detektering och kartläggning av metanemissioner från avfallsupplag och studier av metangasens beteende är mycket komplicerat och inkluderar flera kända men även andra relativt okända samverkande faktorer.

Påverkans- och samverkansfaktorer vid emission av metangas från avfallsupplag:

- täckmaterial och täckningsförhållanden
- deponitryck (på olika nivåer inne i deponin)
- atmosfärstryck
- vindhastighet
- vindinducering
- himmelsstrålningstemperatur (bakgrundsstrålning)
- lufttemperatur
- gastemperatur-lufttemperatur-konvektiva luftströmmar
- deponitryck-atmosfärstryck-tryckskillnader
- deponitemperatur (i ytskiktet och på olika djup i deponin)
- nederbördsförhållanden, fukt i ytskikt och i deponin
- relativa luftfuktigheten
- deponins mikrotopografi
- deponins makrotopografi (typytor, överyta, slänt, släntfot och släntkrön)
- avståndet mellan mätobjekt och mätinstrument (laser=avståndsberoende, IR=temperaturberoende).

Nedan görs en kortfattad redovisning för att illustrera olika typer av påverkans- och samverkansfaktorer vid metanemissioner från avfallsupplag.

Täckmaterial och täckningsförhållanden

Deponierna som ingår i projektet har olika deponisammansättning, täckmaterial och täckningsutföranden. Deponierna är uppbyggd i celler med olika deponimaterial under olika tidsperioder.

Olika täckning ger upphov till olika typer av läckage för metanemission. Här redovisas två typfall av påverkansfaktorer.

Typfall 1. Resultat från fältmätning på sammanlagt 8 deponier indikerar att celler med renodlat hushållsavfall, eller industriavfall, fungerande gasuttagssystem och adekvat täckmaterial och täckningsförfarande avger låga metanemissioner i form av diffus gasemission genom ytskiktet över stora deponiytor. Eventuellt kan högre metanemissioner förekomma vid bristfälliga anslutningar mellan deponiytor eller genom brister i anslutna gasdistributions- och lakvattensystem.

Typfall 2. Celler med bristfällig täckning medför risk för att uppstickande föremål tränger igenom täckmaterialet och bildar kanaler där metangas får lätt att transporteras genom deponimassan och emittera genom ytskiktet på cellytan. I fall där täckmaterialet är tunt och genomsläppligt kan metangas emittera dels som diffus metanemission och dels som punktutsläpp som kan vara frekventa och ge hög emission.

Deponitryck (på olika nivåer inne i deponin)

Metanbildningsprocessen inne i en deponi medför att det bildas ett svagt övertryck i deponin som medverkar till att gasen transporteras genom deponimassorna och emitterar genom ytskiktet på deponin till atmosfären.

Atmosfärstryck

Iakttagelser i samband med fältmätning utförd under olika väder- och utstrålningsförhållanden visar att vid övergången från lågtryck till högtryck så kan inga mätbara metanemissioner registreras med det aktuella lasersystemet för objekt/ytor som tidigare givit låga till höga metanvärden. Dessa iakttagelser finns även redovisade i forskningslitteraturen, men det finns f.n. ingen vetenskapligt dokumenterad förklaring till företeelsen, inte heller vid vilka atmosfärstryck som deponin sluter sig respektive öppnar sig för metanemission. Ett tänkbart sätt att komma till klarhet atmosfärstryckets påverkan på metanemissioner från avfallsupplag är att utföra repetitiva, kontinuerliga långtidsmätningar under längre mätperioder.

Vindhastighet

Vindhastighetens betydelse som påverkansfaktor på metanemission och på mätning av metanemission är väl dokumenterad i forskningslitteraturen och styrker iakttagelserna gjorda inom ramen för projektet.

Vid fältmätning med Siemens lasersystem har konstaterats att omblandningen av metangas med omgivande luft sker mycket snabbt vid för mätningen ogynnsamma vindförhållanden, typ turbulent vind och vindhastigheter 2-3 m/s, vilket momentant och i realtid kan studeras i monitor till lasersystemets fältdator. Merparten fältmätningar med lagring på loggerenhet har begränsats till ≤ 1 minuts registrering.

Kompletterande längre tids mätning av gasemissioner har utförts för ett urval objekt/ytor (1-2 timmar). Resultat från den här typen av fältmätning indikerar att metanemissionen kan variera i både i korta och långa tidsintervaller från 0 ppm upp till 10000 ppm. Huruvida dessa

variationer är i huvudsak förorsakade av vindpåverkan eller en kombination av metanbildningsprocessen, tryckförhållanden inne i deponin, atmosfärstryck, vindpåverkan, och deponins mikrotopografi har inte kunnat utrönas inom ramen för projektet, och resultat från dylika studier finns enligt vår kännedom inte publicerat i forskningslitteraturen.

Iakttagelser inom projektet indikerar att det är ogynnsamt att mäta metanemissioner vid vindhastigheter ≥ 3 m/s, beroende dels på hur mikrotopografin ser ut i mätområdet, och dels om det föreligger risk för emissionsbidrag från luftburna metanemissioner från närliggande objekt/ytor, deponislänter etc.

Det går oftast att detektera metanläckage även om metanemissionsbidrag från intilliggande deponiutor förekommer, men det kan bli svårt att särskilja vad som är emission från den specifika mätytan och emissionsbidrag från omgivande deponiutor.

Vindinducering

Resultat från upprepade fältmätningar inom projektet indikerar att vindinducering har en inverkan på gasflödet där vindinducerade turbulenta luft rörelser ökar metanemissionen genom porer i tätskiktet, genom mikroskopiska kanaler, och små sprickbildningar i deponiutan. Iakttagelser från fältmätningar i projektet visar att detta fenomen förekommer främst vid låga turbulenta vindrörelser, med en vindhastighet 1-2 m/s. Inverkan av turbulenta vindrörelser på transport och emission av metangas vid markytan hos en deponi har studerats av bl.a. Poulsen och Moelndrup (2006). Resultat från en kombinerad datamodell och fältmätning av metanflöden indikerade att vindinducerad gastransport genom turbulenta vindrörelser stod för ca 40 % av den totala gasemissionen under den aktuella mätperioden. Täckmaterialets, jordskiktets genomsläpplighet av luft och amplituden för vindinducerad tryckrelaterad fluktuation bedömdes här som de viktigaste parametrarna för mätning och kontroll av omfattningen av vind-inducerad transport av metangas i deponins ytskikt.

Himmelsstrålningstemperatur (bakgrundsstrålning)

Inverkan av himmelsstrålningstemperaturen är ett väl dokumenterat fenomen inom modern fjärranalys, dels vid tillämpning av laserteknik och dels vid IR-teknik. Clear sky conditions, dvs molnfri himmel under såväl natt- som dagtid är den typ av väderförhållanden som kan påverka mätresultat i både positiv och negativ riktning. Under molnfria förhållanden håller himmelsstrålningen en temperatur på -50/60 °C, oberoende om det är dag eller natt.

Vid fältmätning av gasemissioner, t.ex. med laser, kan molnfri himmel betyda att solinstrålning eller bidrag från natthimlen reflekteras in i strålgången på lasern, påverkar ingående data eller slår ut backscattersignalen till lasern, beroende på hur man riktar lasern i horisontalled, eller om lasern riktas mot en bakåtskrålande yta (backskatteryta) med högre reflektiva egenskaper. Är man medveten om den potentiella effekten av klar himmelsstrålning så kan lasern riktas så att man i mesta mån undviker reflekterande strålningsbidrag.

Vid användning av FLIR IR GasFinder för detektering och visualisering av metanemissioner ger klar himmelsstrålning i stället en motsatt effekt, dvs. kan förbättra möjligheterna att registrera metangas, förutsatt att kameran inte riktas direkt mot något högre reflekterande material, som t.ex. en vattenyta.

Deponiutan emitterar energi till den kallare himmelssfären. Under natten framträder metangasen som varmare än omgivande ytor (ljus gråton), och under dagtid som kallare (mörk gråton). Gråtonsvariationerna i värmebilderna kommer från en bestämning av en strålningstemperatur- och gråtonsskala konstruerad för klassning av det temperaturomfång

som IR-GasFinder-systemet registrerar och elektroniskt omvandlar konverterade fotoner inom IR-enhetens specifika våglängdsområde. Strålningstemperaturen och strålningstemperaturmönstret från objekt/ytor på deponin framträder tydligare vid större skillnad i temperaturen (ΔT) mellan gasen och omgivande objekt. Det finns tillfällen då gasen och omgivande luft och ytor har samma temperatur vilket medför att metangasen under denna tidsperiod inte kan detekteras.

Lufttemperatur

Temperaturvariationer mellan metangas och omgivande objekt bör inte påverka mätresultatet vid detektering av metanemissioner från deponier med Siemens lasersystem, eftersom den är temperaturoberoende. Däremot påverkar temperaturvariationer mätresultatet, möjligheten att detektera och visualisera metanemissioner med IR-system, typ FLIRs IR GasFinder. Låga ΔT mellan gasen och omgivande objekt/ytor ger sämre temperaturupplösning och gör det svårt att detektera och visualisera metangas i värmebilden, medan höga ΔT medför ökade möjligheter att detektera och visualisera metangasen. Molnfri himmel med låg himmelsstrålningstemperatur nattetid, alternativt låg lufttemperatur dagtid ger de bästa temperaturförhållandena för detektering och visualisering av metangas med IR-GasFinder-teknik. Här har inte beaktats komplikationen med ogynnsamma vindförhållanden.

Gastemperatur-lufttemperatur-konvektiva luftströmmar

Temperaturskillnader mellan metangas och omgivande luft ger upphov till densitetsskillnader. Det är inte densiteten i sig utan densitetsskillnaden som är intressant vid mätning och analys av metanemissioner från avfallsdeponier.

Naturlig konvektion

Skillnader i densitet mellan metangas och omgivande luft ger upphov till naturlig konvektion. I detta sammanhang har man två effekter av densitetsskillnaden. (a) Vid samma temperatur är metangasen lättare än luft. Detta ger upphov till en uppåtgående ström av metangas. (b) Om gasen är varmare än omgivande luft förstärks den uppåtgående rörelsen. Om gasen är kallare än omgivande luft försvagas den uppåtgående rörelsen, vilket kan medföra att gasen flyter ut parallellt med markytan.

Detta skall inte blandas ihop med turbulens skapad av vinden, som troligen är den faktor som är allra viktigast för att förstå den snabba inblandningen av metangasen med omgivande luft.

Deponitryck-atmosfärstryck-tryckskillnader

Skillnader i tryck mellan atmosfären och deponin skapar lufrörelser. Vid högre tryck i deponin förstärks den uppåtgående rörelsen av metangas.

Påtvingad konvektion

Lufrörelsen som skapas av tryckskillnader kallas för påtvingad konvektion. Vid tryckskillnader med högre tryck i deponin skapas en transport av deponigasen från områden med högre tryck mot områden med lägre. Högre atmosfärstryck motverkar och försvagar initialt den uppåtgående transporten av metangas. Temperatur-skillnader mellan metangas och omgivande luft ger således upphov till konvektiva lufrörelser ovanför markytan där metangas läcker ut dels genom diffusa emissioner och dels som punktutsläpp genom sprickbildningar och hål i deponiytans tätskikt. Iakttagelser från fältlaborativa studier vid Malmö Brandkårs gasövningsplats och från olika fältmätningar inom projektet indikerar att även små lufrörelser vid markskiktet på en deponi kan ge upphov till en snabb omblandning av metangasen med omgivande luft.

Tryckskillnader mellan deponin och atmosfären är liksom en viktig påverkansfaktor som vid högt deponetryck kan öka metanemissionerna och vid högt atmosfärstryck kan motverka, försvaga eller förhindra metangasen att emittera till atmosfären. Iakttagelser från fältmätningar bl. a. vid Forsbackadeponin indikerar att tryckskillnader mellan deponin och atmosfären påverkar metanemissionen.

Flöde-flödeshastighet

Vid höga flöden från läckagekällor med trånga passager genom små sprickbildningar och små håligheter i deponiskiktet uppstår jetströmmar vilket medför att den konvektiva flödesprocessen sker först en bit upp i lufrummet ovanför läckagekällan. Detta fenomen har uppmärksamats bl.a. genom de fältlaborativa studier med kontrollerbara simuleringar av läckage av naturgas som utförts vid gasövningsplatsen BARBARA, Malmö Brandkår och de kontrollerbara simuleringar av biogas och mätning med laser som utförts vid Filborna avfallsupplag, NSR. Liknande iakttagelser har gjorts vid mätning av emissioner från t.ex. uppstickande föremål, typ rör eller metallföremål vid blandat deponimaterial, t.ex. vid Forsbacka och Löt, samt metanläckage från gasdistributionsrör vid upplaget F1 i Frankrike.

Resultatet från de redovisade fältlaborativa mätningarna och iakttagelser vid fältmätningar indikerar att flöden-flödeshastigheten relaterad till läckagekällans specifika egenskaper kan påverka och ge varierande mätresultat beroende på var laserstrålen riktas vid förekomst av höga flöden från trånga passager. Riktas laserstrålen som normalt vid pinpointing i direkt anslutning till eller nära läckagekällan ($\leq 0,5$ m) så kan man få felaktigt likvärdiga ppm-värden oavsett om man simulerar helt olika metanflöden. Eftersom metangas inte är synlig för det mänskliga ögat så vet man inte var i gasplymen man mäter. Om man kompletterar lasermätningen med mätning med ett IR-GasFinder system kan man dels detektera läckagekällan och dels visualisera gasplymen och rikta lasersystemet för mätning av gaskoncentrationen i ppm på önskad del av gasplymen.

Nederbördsförhållanden, fukt i ytskikt och i deponin

Iakttagelser från upprepade fältmätningar bl. a. vid F2-området vid Forsbackadeponin indikerar att markfuktighet är en viktig parameter som påverkar förutsättningarna för metanemission från ett avfallsupplag. Under förhållanden med hög fukthalt i ytskiktet stänger sig porerna i täckmaterialet och fukten fungerar som ett lock som förhindrar metangasen att emittera genom ytskiktet på deponin. Samtidigt som metanläckagen genom diffus emission eller genom mikroskopiska sprickbildningar minskar så har ökade metanemissioner dokumenterats från närliggande större sprickzoner. Om inga andra parametrar (vind, tryck etc.) ändrar sina parametervärden så tycks ökningen av metanemissionerna genom de öppna sprickzonerna vara en konsekvens av att gasen vid hög fukthalt i deponins ytskikt söker sig den lättaste vägen ut genom ytskiktet.

Om nederbörd i form av regn följs av stark och ihållande vind kommer fukten från regnfallet snabbt att torka upp och metangasen emitterar efterhand återigen genom sina tidigare kanaler före regnfallet. Emellertid, under förhållanden med längre kraftig nederbörd eller om det varit ett tungt snötäcke över deponiytan kan tidigare läckagekällor stängas helt och gasen söker sig andra vägar och bryter upp nya kanaler än de som tidigare dokumenterats och positioneras med GPS.

Deponigas som strömmar mot ytan på en deponi är fuktmättad. När den når ytskiktet och atmosfären kommer fukten i gasen ofta att kondensera i ytan av deponin. Hög fukthalt hindrar i sin tur gasen att strömma ut. Gasen tar sig då andra vägar ut ur deponin (Börjesson, 2008).

Gasen själv bidrar på detta sätt till dynamiken, så att utsläpp i ytan flyttas, med omväxlande mindre och större flöde.

Slutsatsen från projektet och från refererad litteratur blir att det är nödvändigt med ytterligare fältrelaterade studier för att öka kunskapen om metantransporter genom deponiskikt och metangasens beteende relaterad till fukthalten i översta täcksiktet och i ytsiktet av en deponi. Kanske genom en kombination av lasermätningar och geoelektricitetsmätningar i deponilagret närmast tätsiktet.

Relativa luftfuktigheten i luften ovan deponin

Studier av variationer i relativa luftfuktigheten i luftskiktet närmast deponiytan har inte utförts i tillräcklig omfattning inom projektet för att kunna bedöma vilken roll luftfuktigheten har som påverkansfaktor vid kartläggning av metanemissioner från avfallsupplag. Iakttagelser har gjorts vid olika fältmätningar som indikerar att en hög relativ luftfuktighet i likhet med lätt nederbörd kan få porerna att sluta sig och minska eller förhindra metanemission från deponiytor. Relativa luftfuktigheten kan ha sin största påverkan på metanemissioner som påspädningsfaktor vid tillfällen då markytan redan är fuktig genom tidigare nederbörd.

Deponins mikrotopografi

I samband med olika fältmätningar av metanemissioner med Siemens lasersystem har noterats att mikrotopografin har betydelse som påverkansfaktor vid såväl små vindrörelser som höga vindhastigheter. Dvs. små ojämnheter i ytsiktet, allmänt betecknat som ytråhet, kan ge upphov till relativt små variationer i luftfuktighet i mikrosiktet i deponiytan som kan medföra snabba variationer i metanemissionen. Vid momentana fältmätningar kan det även vid små variationer i metanemissionen vara svårt att visuellt bestämma det representativa ppm-värdet vid läckagekällan. Vid samtidig loggning av laserdata kan man dock göra en medelvärdesbildning av ppm-data samt välja max- och min-värde för en utvald mätperiod.

Deponins makrotopografi (typytor, överyta, slänt, släntfot och släntkrön)

Ett avfallsupplag består vanligtvis av deponiytor (överyta, slänt, släntfot, släntkrön) med variationer i topografin, dels beroende på sättningar i deponimassorna, dels beroende på uppbyggnaden av deponin. En icke sluttäckt deponi genomgår en ständig förändring av topografin och består vanligtvis av olika celler av olika höjd, geometrisk form och ytstorlek.

Emissionsbidrag från andra metanemitterande objekt eller deponiytor

Vid mätning med ett laserinstrument mäts koncentrationen mellan instrumentet och den bakåtskrämda ytan (backskatterytan). Vid detektering är uppgiften att finna ett metanläckage, oftast ett punktformigt utsläpp. Risk finns, speciellt vid skanning över deponiytan med instrumentet pekande 10-15 m mot backskatterytan, att metan från intilliggande deponiytor kommer med vid registrering. Ett "falskt" läckage registreras.

Det är således av vikt att känna till stora läckage på deponins olika delar på ett tidigt stadium av en skanningsmätning samtidigt som det är viktigt att känna till vindriktningen, då vinden är transportör av "importerad" metangas. Här spelar topografi också stor roll då deponins höjder och sänkor påverkar vindriktningen nära deponiytan där laserinstrumentet registrerar metankoncentrationen.

Avståndet mellan mätobjekt och mätinstrument (Laser - avståndsberoende, IR – temperaturberoende)

Laserinstrument för detektering av metangas är avståndsberoende och IR-system för detektering och visualisering av metangas är temperaturberoende.

Är avståndet mellan laserinstrument och backskatteryta känt kan medelkoncentrationen beräknas.

Som framgår av fältlaborativa experiment så har varje lasersystem en speciell sträcka inom vilket lasern kan få en backskattersignal som medger detektering av den aktuella gasen. Siemens lasersystem är specificerad till ca 30 m. Med hjälp av en lämplig reflektoryta kan den operativa sträckan förlängas till 150-200 m beroende på rådande ljusförhållanden vid mätningen. Det reflekterande material som används på vägskyltar är utmärkt för att göra en reflektor.

IR-systemens temperaturberoende är mer problematiskt att komma runt. Ett sätt är att välja tidpunkt för fältmätningen som ger hög temperaturskillnad mellan gasen och omgivningen. Fältlaborativa mätningar utförda bl.a. vid Brandkårens gasövningsplats, BARBARA, i Malmö, indikerar att mätning nattetid under molnfri himmel ger stabila mätförhållanden för att detektera och visualisera metangasemissioner.

18.3 Georesistivitmätningar, diskussioner och slutsatser

Fältarbetet utfördes under goda mätförhållanden vilket resulterade i data med hög kvalitet, och vid samtliga mätningar erhöles en relativt god bild av resistiviteten under markytan. Alla resistivitmätningar visade likartade förändringar i resistivitet vilket indikerar att mätdata är pålitlig och utgör en bra grund för tolkning av processer under markytan.

Resultaten av resistivitmätningarna visade värden i samma storleksordning eller något lägre, jämfört med resultat som presenterats från andra undersökningar (Bernstone och Dahlin, 1997, Guérin et al., 2004). Mätningarna visade även zoner med avsevärt högre resistivitet. Hög vattenhalt, joninnehåll och högt organiskt innehåll kan förklara den relativt låga resistiviteten, medan ett relativt högt gastryck i marken delvis förklarar den högre resistiviteten. Det bör dock påpekas att även temperaturvariationer påverkar resistiviteten.

Relativa skillnader i resistivitet under mätningarna undersöktes med tolkning med hjälp av så kallad *time lapse inversion*. Denna tolkning visade på stora förändringar i resistivitet, framför allt vid slänkfot. Processerna under markytan kan anses vara snabba eftersom förändringarna skedde inom några timmar. Sannolikt beror de snabba förändringarna till största del på förändringar i gastryck i markprofilen och sålunda indikeras ett gasflöde i marken. För att få en bättre förståelse för processerna i marken föreslås att annan information, som till exempel portryck och temperatur registreras samtidigt som resistiviteten mäts.

Korrelation mellan mätningar med laser och statisk kammare undersöktes. Genom att plotta data från mätningarna kunde en viss korrelation konstateras. I vissa mätserier var dock korrelationen obefintlig i rådata. Då vissa extremdata (så kallade outliers) exkluderades ur några av mätserierna kunde avsevärt bättre korrelation konstateras. Det kunde sålunda konstateras att en viss korrelation mellan lasermätningarna och mätningarna med statisk kammare.

När resultaten från resistivitetsmätningarna jämfördes med resultat från mätningar med statisk kammare och lasermätningar, kunde inga uppenbara korrelationer konstateras. Det vill säga, mätningar under markytan jämfördes med mätningar ovanför markytan. De gasrörelser under markytan som indikerades med resistivitetsmätningarna vid släntfot kunde inte konfirmeras med mätningarna ovan markytan, med laser och statisk kammare. Det konstateras därför att för att detektera gasflöden under och ovan markytan vid samma tillfälle kräver utveckling av mätsystem. En ytterligare slutsats av undersökningarna är att systemet under markytan vid en avfallsdeponi är mycket variabelt, både i tid och rum, vilket resulterar i att systemet är svårt att förutsäga. Därför föreslås fortsatta utveckling av tekniker för mätning och tolkning av mätningar, för att bättre kunna förstå och förutsäga gasrörelser i deponier.

18.4 *Manualer för användning av laserinstrumentet och IR-kameran*

Se bilaga 1.

19 SLUTSATSER

Resultat från upprepade fältmätningar av metanemissioner från 7 deponier i Sverige, figur 11.1. samt 2 i Frankrike indikerar att:

- Modern fjärranalysteknik, typ Siemens lasersystem och FLIRs IR-GasFinder samt georesistivitetsmätningar bedöms ha en stor informations- och användarpotential för att detektera, kartlägga och lägesbestämma metanemissioner från avfallsupplag. Tekniken kan användas att öka kunskapen om metangasens specifika egenskaper och beteende vid avfallsdeponier.
- Siemens lasersystem kan användas för att (a) systematiskt skanna och indikera förekomst av metanemissioner för stora deponiytor, och (b) för att detektera och lägesbestämma metanemissioner från olika läckagekällor, objekt och ytor på en avfallsdeponi. Med laserinstrumentet kan man genom skanning detektera ca 1 ha/h på en deponi.
- Infraröd teknik, typ FLIRs IR-GasFinder kan företrädesvis användas som komplement till lasermätning för att detektera, visualisera och synliggöra emission av metangas, identifiera läckagekällan och studera spridningsmönstret hos metangas.
- Resultat från repetitiva fältmätningar med laser- and IR system indikerar att fjärranalysteknik generellt har god träffsäkerhet och är relativt lätt att operera i fält.
- Siemens lasersystem är utvecklat för att mäta och registrera metanemissioner i ppm vilket är ett koncentrationsmått. Det är punktvisa emissioner av metan från deponiytan som detekteras med laserinstrumentet. Det minsta klart märkbara punktutsläppet ger en koncentration av ca 35 ppm x m vilket motsvarar en koncentrationsnivå i luften ovan utsläppspunkten av ca 60 ppm. I sin tur har detta motsvarat ett utsläpp av metan av storleksordningen 35 – 290 m³ CH₄/år.

- Samtliga detekterade utsläppspunkter vid de deponier som skannats i sin helhet (2 stycken) utgör en liten del av den totala metanemissionen. Styrkan i mätmetoden är inte att finna den totala metanemissionen från en deponi, utan att snabbt detektera var de punktvisa emissionspunkterna är belägna. Snabbheten medger också upprepade mätningar som ökar tillförlitligheten i mätningarna. Mätning efter emissionsbegränsande åtgärder visar på ett enkelt sätt huruvida dessa lyckats.
- Data från fältmätningar med laser, IR och lägesrelaterad data från GPS kan tillsammans med fältreferensdata lagras i realtid på en logger för jämförande tolkning och analys efter mättillfället.
- Spridningsbilden av gaskoncentrationer registrerade med laserdata och referensdata kan presenteras kartografiskt i 3-D bilder vilket ökar möjligheten att visuellt studera och analysera spridningsmönstret av metanemission, fördelning och positionering av läckagekällor uttryckt i ppm metankoncentration för respektive läckageobjekt/yta.
- I projektet har kammarmetoden använts för att försöka kvantifiera utläckaget som detekterats med laserinstrumentet. Om alla individuella mätvärden med kammarmetoden ställs mot motsvarande mätvärden för laserinstrumentet erhålls ett samband. Det går på detta sätt att erhålla kvantitativa mått på utläckaget. Den stora svårigheten är att det inte utan stora insatser går att verifiera resultatet.
- I en särskild undersökning har försök gjorts att kartlägga och studera gasrörelser i deponin med georesistivitets-mätningar. Mätresultat från försöken indikerar att det förekom snabba förändringar i resistiviteten som i sin tur kan tolkas som deponigasrörelser. Det återstår utvecklingsarbete för att på detta sätt erhålla data som kan klart visa gasrörelserna i en deponi.
- Nackdelen med Siemens lasersystem är dels den begränsade räckvidden specificerad till ≤ 30 m, dels att det är ett prototypsystem som måste uppgraderas och göras robust för fältoperativt bruk, i enlighet med slutanvändarens behov och önskemål. Problemet med den begränsade räckvidden kan, enligt fältförsök inom projektet, lösas genom att man använder ett lämpligt reflektormaterial, liknande det som sitter på vägskyltar, skyddskläder, etc. som backskatteryta, och kan genom denna enkla åtgärd öka laserns räckvidd till 150-200 m beroende på väder- och utstrålningsförhållanden.
- Data från fältmätningar med laser, IR och lägesrelaterad data från GPS kan tillsammans med fältreferensdata lagras i realtid på en logger för jämförande tolkning och analys efter mättillfället.
- Forskningslitteraturen visar att det pågår en omfattande FoU-verksamhet för att studera problematiken kring metanemissioner från avfallsupplag och för att utveckla teknik och metoder för att kartlägga emissionsstatus för olika typer av avfallsdeponier.
- En deponi består av olika typer som kan definieras som typiska från metanemissions-synpunkt. Sådana ytor är t.ex. överyta, släntrön, slänt och slänthot, där överytan utgör en plan deponiyta som vanligtvis avger låga diffusa metanemission p.g.a. den ofta har en väl fungerande täckning. Släntrön, slänt och slänthot har mer komplicerad struktur och uppbyggnad och därför svårare att täcka. Här ger sättningar och otillräcklig täckning ofta upphov till varierande typer och grad av metanemissioner. Tippersår måste nämnas som källor till stora metangasutsläpp.

- Vid kartläggning av emissionsstatus hos en avfallsdeponi är det lämpligt att dela upp deponin i olika typytor representativa för den aktuella deponin från emissionssynpunkt. Typytorna undersöks systematiskt var för sig för att identifiera och klassificera förekomst av metanemission, diffusa eller punktläckage, och för att ta fram ett adekvat underlag för prioritering av åtgärder.
- Gasuttagssystem och lakvattensystem är andra viktiga delar av en avfallsdeponi som bör undersökas systematiskt i syfte att kartlägga förekomst av metanemissioner och göra en bestämning av dess tekniska status från emissionssynpunkt.
- Indelning av deponiytor i delytor har strukturerat och underlättat skannings- och utvärderingsarbetet i projektet.
- Spridningsbilden av gaskoncentrationer registrerade med laserdata och referensdata kan presenteras kartografiskt i 3-D bilder vilket ökar möjligheten att visuellt studera och analysera spridningsmönstret av metanemission, fördelning och positionering av läckagekällor uttryckt i ppm metankoncentration för respektive läckageobjekt/yta.
- Slänterna hos en avfallsdeponi ger högre och mer frekventa metanemissioner än överytor. Speciellt gäller detta för branta och höga slänter. Andra faktorer som påverkar metanemissioner från en deponi är täckning och avfallets ålder
- Avfall i form av föremål som sticker upp genom täckning ger ofta upphov till läckage genom att täckningen är punkterad.
- Nedbrytning av organiskt avfall och metangenererande processer i en deponi kan pågå under mycket lång tid efter att deponeringen av avfall avslutats vilket bekräftas bl.a. av resultat från mätningar vid utgrävning av ca 50 år gammalt avfall vid Ringstorpsdeponin, Helsingborg, där pågående nedbrytning av avfallet fortfarande ger upphov till deponigas.
- Fältmätning med Siemens lasersystem kompletterad med reflektormaterial medför att den här typen av laser i likhet med betydligt dyrare lasersystem i marknaden kan användas för att mäta och kartlägga metankoncentrationen över stora deponiytor.
- Rätt utvecklat och anpassat till slutanvändarnas behov kan modern fjärranalysteknik och operativa fjärranalysmetoder komma att bli ett kostnadseffektivt hjälpmedel för en rad olika tillämpningar, såsom:
 - a) Förebyggande kontroll och underhåll av gasuttagssystem för att indikera om ett gasuttagssystem är i funktionellt god status eller har tekniska problem och brister som kan resultera i okontrollerade metanemissioner.
 - b) Som hjälpmedel för att ta fram underlag för olika typer av åtgärder/deponiarbeten.
 - c) Kontroll före och efter åtgärd.
 - d) Kvalitetskontroll och avstämning av olika arbetsmoment vid konstruktion och installation av pumpstationer och gasdistributionssystem.
 - e) Kontroll av ofrivillig transport av metangas via gaslednings- och lakvattensystem (ledningar, brunnar, dammar etc.).

- Resultaten från fältmätning för statusbestämning av gasuttagssystem indikerar att moderna gaslednings- och pumpsystemen (gasbrunnar, etc.) generellt är i funktionellt bra skick, medan äldre gasuttagssystem behöver kontinuerlig övervakning och uppgradering av hela eller delar av systemen.
- Upprepade långtidsmätningar över långa mätperioder under olika årstider, väder- och utstrålningsförhållanden tycks vara den enda framkomliga väg för att skapa kunskap om och beskriva metanemissionernas cykliska förlopp och för att förstå metangasens beteende hos avfallsupplag.
- Det syns angeläget att tillverkare av laser och IR-system för detektering av metanemissioner från avfallsupplag gemensamt samordnar utvecklingen av nästa generation ”remote gas detection systems” anpassade till slutanvändarens behov.

20 FÖRDJUPAD FORSKNING OM ANGELÄGNA FORSKNINGSPROBLEM

I likhet med andra FoU-projekt som VOGUE-projektet, förstudierna vid fältlaboratoriet i Malmö och vid Filborna har det aktuella projektet givit resultat som dels besvarar eller belyser angelägna forskningsfrågor men som också ger upphov till nya frågor som bedöms angelägna att studera inom ramen för fördjupade forskningsinsatser.

VOGUE-projektet har resulterat i utvecklingen av prototyper av lasersystem för detektering och kartläggning av metanemissioner från distributionssystem för naturgas uttryckt i måttsenheten ppm x m, men har också givit kunskap om metangasens spridningsbild och beteende under olika tryck, flöden, väder- och utstrålningsförhållanden.

Förstudierna vid fältlaboratoriet i Malmö och vid Filbornadeponin i Helsingborg har givit kunskap om användbarhet och begränsningar hos det i VOGUE-projektet utvecklade laser-prototypsystem. De har också givit underlag för bedömning om fältmätning med laser- och med ett nyligen konstruerat IR-GasFinder system är användbara för att detektera och kartlägga metanemissioner från avfallsupplag.

Dessa tre projekt har gemensamt och tillsammans med kunskap om deponiers uppbyggnad, metangenerering, användbarhet och begränsningar hos etablerad fältmätteknik, hämtad från forskningslitteraturen bildat en viktig del av kunskapsbasen för planering och genomförande av det aktuella projektet.

Vid en gemensam genomgång vid referens- och arbetsgruppsmöten och genom kontakter och diskussioner med forskare inom angränsande discipliner och ämnesområden har utkristalliserats en rad frågor kopplade till framtida teknikutveckling och uppgradering av existerande laser- och IR-system men även frågor av mer grundläggande forskningskaraktär. Dessa frågor berör dels generering av metangas i en deponi, deponimaterialens betydelse för uppbyggnaden av metan, funktion och tillstånd hos gasuttags- och lakvattensystem, mikrobiologiska processer etc., och dels kopplingen mellan kunskap-, teknik- och metodutvecklingen inom deponiområdet i Sverige relativt andra länder.

Nedan görs en kortfattad redovisning av några av de frågor som bedöms angelägna att studera och försöka besvara inom ramen för ett fördjupat FoU-projekt:

1. Det är angeläget att slutanvändarna får tillgång till ett billigt och fältmässigt hanterbart system för att detektera, kvantifiera, visualisera och lägesbestämma gasemissioner från avfallsupplag. Här bör beaktas att ett dylikt system bör vara anpassat så att det medger mätning av snabba förlopp. För att konstruera ett sådant system krävs både fortsatta forsknings- och utvecklingsinsatser, och en tillräckligt stor avsättningsmarknad.

Mot bakgrund av den stora satsning som tidigare gjorts inom EU-projektet VOUGE finns det anledning att tro att det finns både lämplig kompetens och intresse för att genomföra den här typen av FoU-projekt. Resultaten från den forskning som utförts inom här avrapporterat projekt skulle kunna användas som en kunskapsbas och underlag för fördjupade studier av fältoperativa faktorer relaterat till detektering och kartläggning av metanemissioner under verkliga fältförhållanden, redovisade inom projektet. Denna kunskap är nödvändig för utveckling av teknik och fältmetoder för detektering och kartläggning av gasemissioner från avfallsupplag, anpassat till slutanvändarnas behov.

2. Resultat från projektet visar att det föreligger behov av att utföra upprepad långtidsmätning med laser för ett urval deponiytor med kända metanläckage under olika väder- och utstrålningsförhållanden, under olika årstider. Detta för att bättre förstå sambandet mellan olika faktorer och deras inverkan på gasemissionen från avfallsupplag.

Ökad kunskap och förståelse dels om metangasen beteende och dels om hur olika fukt, vind och tryckförhållanden påverkar metanemissionen från deponiytor kan dels användas som input i flödesmodeller, dels som underlag vid utveckling av ny mätteknik, och dels som underlag för förebygganden kontroll och underhåll av en deponi och dess distributionssystem. Med långtidsmätning avses här laser- och kombinerad fältreferensmätningar för sammanhängande mätperioder på 2-4 veckor.

Fältmätningarna inom ramen för det avrapporterade projektet har som redovisats i metodkapitlet utförts dels som skanning över stora deponiytor och dels som detaljerad mätning av detekterade läckagekällor. Det var först i ett relativt sent skede av projektet som ett loggersystem introducerades som medger mätning under längre tidsperioder.

Det aktuella lasersystemet medger i sin nuvarande utformning inte långtidsmätningar av det slag som åsyftas ovan. Dock, som framgår av resultaten från avrapporteringen, kapitel 12, så indikerar de fältmätningar som utförts med laser i kombination med fältreferensmätningar med laser- och fältdata lagrade på logger att det förekommer stora och snabba variationer i metanemissionen från läckagekällor vid såväl korttidsmätningar (0,5-1 minut) som vid längre mätningar (1-2 timmar).

Resultatet från det avrapporterade projektet bör kunna användas som underlag för att prioritera faktorer som bör specialstuderas för ökad förståelse av hur olika deponi-, väder- och utstrålningsförhållanden påverkar metanemissionen från avfallsupplag.

3. Det föreligger behov av att utföra kontrollerade fältlaborativa studier för en avgränsad deponiyta för att mäta och studera metanemissioner med laser, IR-teknik, kammarmetod och resistivitetssmätningar. Syftet med denna typ av fältlaborativa studier är att så långt möjligt kunna studera en variabel i taget och utvärdera dess inverkan på metanemissionen. Med den här typen av fältlabb bör det också vara möjligt att under kontrollerade förhållanden mäta diffus metanemission från deponiytan.
4. Försök med geoelektricitetsmätningar (resistivitetssmätningar) utförda vid bl.a. Filbornadeponin indikerar att det är möjligt att kartlägga deponigasens rörelser på olika djup. Metoden medger också kartläggning av förekomst av fuktförhållanden i ytskiktet och lokalisering av vattenmagasin i en deponi. Det syns angeläget att studera sambandet mellan deponigasens rörelser och jämföra med lokaliseringen av metanemissioner i deponiytan detekterad och kartlagd med laser- IR-system, kombinerat med flödesmätning genom kammarmetod.
5. Inom forskningslitteraturen redovisas iakttagelser och resultat som i likhet med resultaten från det avrapporterade projektet indikerar att en stor del av metanemissioner från en avfallsdeponi kan emittera genom distributionsnätet hos gasuppsamlings- och lakvattensystem. Det syns angeläget att undersöka huruvida dessa iakttagelser är riktiga och i så fall i vilken omfattning de förekommer. Denna fråga kan antingen studeras inom ramen för ett separat projekt eller ingå som del i ett mer övergripande FoU-projekt.

21 REFERENSER

Adam H. (2008) Personlig kontakt angående Boreal, teknik ang. VRPM-metoden.

Augenstein D. and Pacey J. (1991) Modeling landfill methane generation., Conference proceedings, Sardinia 91 - 3rd International Landfill Symposium, CISA, Italy, vol.1, 115-148.

Bendz D., Bramryd T., Ohlsson T. and Meijer J-E. (1999) Avfallsdeponering - trender, strategier och hållbar utveckling, AFR-Rapport 260, Naturvårdsverket, Stockholm.

Bergman H. (1995) Metanoxidation i täckskikt på avfallsupplag, Licentiatuppsats, 1995:14, ISSN 0280-8242, Tekniska Högskolan i Luleå.

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.

Bogner J., and Spokas K. (1993) Landfill CH₄: rates, fates, and role in global carbon cycle, Chemosphere, vol.26, Nos.1-4, 369-386.

Boutwell G. P. and Fiore V. A. (1995) Settlement of clay cover on saturated garbage. Geoenvironment characterization, containment, remediation, and performance in environmental geotechnics. A. B. Yalcin and D. E. Daniel. New York, American Society of Civil Engineers. 2, 964-979.

Börjesson G., et al. 2000: Methane Fluxes from a Swedish Landfill Determined by Geostatistical Treatment of Static Chamber Measurements, Environ. Sci. Technol. 2000, 34, 4044-4050.

Börjesson G., Galle B., Samuelsson J. and Svensson B. J. (2000) Methane Emissions from Landfills, Options Control for Measurement and Control, Proceedings Waste 2000 Conference, Stratford-upon-Avon 2-4 October 2000.

Börjesson G., 2008: Muntlig information angående rörelser av deponigas och metanoxidation i deponiytan.

Cardelli E. and Di Filippo G. (2004) Integrated geophysical surveys on waste dumps: evaluation of physical parameters to characterise an urban waste dump (four case studies in Italy). Waste Manage Res. 2004; 22: 390-402.

Chanton J., Hater G., Goldsmith D., Green R., Abichou T. and Barlaz M. A. (2007) Comparison of a Tunable Diode Laser Approach with Static Chambers for Determination of Surface Methane Emission, Proceedings Sardinia 2007, 11th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy 1-5 October 2007.

Christensen T. H. and Kjeldsen P. (1989) Basic Biochemical Processes in Landfills. In: T. H. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann (Editors), Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, Academic Press, 29-49, 1989.

Crill P. and Riise A. (2005) Assessment of Local Sources of Methane from Biomass Burning in Lycksele, Department of Geology and Geochemistry Stockholm University, BHM Report for Project P21851-1.

Dahlin T. and Zhou B. (2004) A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays, *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398.

deGroot-Hedlin C. and Constable S. C. (1990) Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, 55, 1613-1624.

Edil T. B., Ranguette V. J., et al. (1990) Settlement of municipal refuse, I: A. O. Landva and D. Knowles (Editor), *Geotechnics of waste fills - Theory and practice*. ASTM special technical publication, Philadelphia, USA 225-239, 1990.

Ehrig H-J. (1991) Prediction of gas production from laboratory scale tests. In: Conference proceedings, Sardinia 91 - Third international landfill symposium, vol.1, 87-114.

El-Fadel M., Findikakis A. N. and Leckie J. O. (1996) Temperature effects in modelling solid waste biodegradation, *Env. Techn.*, Vol. 17, 925-935.

El-Fadel M., Findikakis A. N. and Leckie J. O. (1997) Environmental Impacts of solid waste landfilling, *J. Env. Manag.*, 50, 1-25.

Farquhar G. J. and Rovers F. A. (1973) Gas production during refuse decomposition, *Water Air Soil Pollut.* 2, 483-495, 1973.

Envirotech Engineering (2007) Review and Update of Methods used for Air Emission Leak Detection and Quantification, Prepared for Technology Alliance Canada Technology for Emission Reduction and Eco-Efficiency (TEREE) Steering Committee.

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.

Gurijala K. R. and Robinson J. A. (1997) Statistical modelling of methane production from landfill samples, *Applied and environmental microbiology*, vol. 63, no. 10, 3797-3803.

Harris M. R. R. (1979) A study of the behaviour of refuse as a landfill material. PhD. Thesis, Dept. Civ.Eng., Portsmouth Polytechnic, UK, 144pp.

Hogland K. H. W., Jagodzinski K. and Meijer J-E. (1995) Landfill mining tests in Sweden., Conference Proceedings, Sardinia 95 - Fifth International Landfill Symposium, Cagliari, CISA, Italy, vol.III, 783-794.

Huitric R. (1981) Sanitary landfill settlement rates, Technische Universität Berlin, 1981.

IPCC (2007) Fourth Assessment Report, Working Group III Report "Mitigation of Climate Change", Waste Management.

IPCC (2007) Fourth Assessment Report, Working Group I Report "The Physical Science Basis" Chapter 2, Changes in Atmospheric Constituents and in Radioactive Forcing.

Jakobs J., Scharff H., Hensen H., Kraai A., Scheutz C. and Samuelsson J. (2007) Testing a simple and low cost methane emission measurement method, Proceedings Sardinia 2007, 11th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy 1-5 October 2007.

Jesionek K. S., Dunn R. J., et al. (1995) Evaluation of landfill final covers., Conference proceedings, Sardinia 95 - Fifth International Landfill Symposium, CISA, Italy, vol.II., 509-532.

Klink R. and Ham R. K. (1982) Effects of moisture movement on methane production in solid waste landfill samples. Resources and Conservation, 8, 29-41.

Knox K. (1996) Leachate recirculation and its role in sustainable development, IWM Proceedings, UK, March, 10-15.

Lagerkvist A. (2007) Muntlig information om mossart och förekomst av metanemission.

Landva A. O. and Clark J. I. (1990) Geotechnics of waste fill. -Geotechnics of waste fills - theory and practice. Philadelphia, ASTM Special Technical Publication: 86-103.

Leushner A. P. and Melden H. (1983) Landfill enhancement for improving methane production and leachate quality, 56th Annual conference of the water pollution control federation, Atlanta, Georgia.

Lewis A. W., Yuen S. T. S. and Smith A. J. R. (2003): A Case Study Using Infrared Thermography to Detect Landfill Gas Leakage, Proceeding Sardinia, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, St Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 6-10 October.

Ljungberg S-Å., Kulp T. J. and McRae T. G., (1997) State-of-the-art and Future Plans for IR Imaging of Gaseous Fugitive Emission, Thermosense XIX 1997, SPIE Vol 3056, Bellingham, Washington.

Ljungberg S-Å. (2000) Flygburen fjärranalys för gasdetektering. Slutrapport från fältlaborativa försök, KTH-BMG, Arbetsrapport Svenskt Gastekniskt Center AB, AGC A24.

Ljungberg S-Å., et al. (2000) State of the art of technologies for remote detection of natural gas. Report SGC 110. ISSN 1102-7371, ISRN SGC-R—110—SE, June.

Ljungberg, S-Å. and Jonsson O. (2002) Passive gas imaging-preliminary results from gas leak simulations – a field study performed during real world conditions. Thermosense XXIV, SPIE Vol 4710, Bellingham, Washington.

Loke M.H. and Barker R.D. (1996) Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion, Geophysical Prospecting, 44, 499-523.

Maurice C. (2001) Bioindication and Bioremediation of Landfill Emissions, Doctoral Thesis, Department of Environmental Engineering, Division of Water Science and Technology, Luleå University of Technology, report 2001:29.

Maurice A., Bergman H., Ecke H. and Lagerkvist A. (1995) Vegetation as a Biological Indicator for Landfill Gas Emissions, Conference proceedings, Sardinia 95 - Fifth International Landfill Symposium, CISA, Italy.

Meijer J-E. (2000) Muntlig kommunikation, NSR.

Moreau S., Bouyè J-M., Duquennoi C., Barina G. and Oberti O. (2004) Electrical resistivity survey to investigate biogas migration under leachate recirculation events. Waste 2004; Integrated waste management and pollution control policy and practice, research and solutions, Stratford-upon-Avon, September.

Naturvårdsverket (2001) Avfallsdeponiers påverkan på växthuseffekten – metanemissioner, åtgärder och uppföljning, M 2001/1988Mk, 501-2832-01(NV).

O'Leary P. and Walsh P. (1995) Landfill Gas Basics, C240-A180 Solid waste landfills correspondence course, Waste Age.

Richards K.M. (1989) Landfill gas working with Gaia, Biodeterioration Abstracts, vol.3, No.4, 317-331, 1989.

Rosqvist H., Dahlin T., Fourie A., Rohrs L., Bengtsson A. and Larsson M. (2003) Mapping of leachate plumes at two landfill sites in South Africa using geoelectrical imaging techniques. Proc. Ninth International Waste management and landfill symposium, Cagliari, Sardinia, Italy.

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, Cagliari, Sardinia, 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, Cagliari, Sardinia, Italy.

RVF (1997) Samordnad deponigas, Forskning, Utveckling, Demonstration; RVF Rapport 97:7; ISSN 1103-4092.

Savanne D., et al. (1998) Comparison of seven Methods for Measuring Methane Flux at a Municipal Solid Waste Landfill Site, Proceedings Third Swedish Landfill Research Symposia 1998.

Scheutz C., Fredenslund A., Nedenskov J. and Kjeldsen P. (2007) Methane Mass Balance for AV Miljö - A Modern Disposal Site with a low Organic Content, Proceedings Sardinia 2007, 11th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy 1-5 October.

Statens Energimyndighet, Naturvårdsverket (2004) Prognoser över utsläpp av växthusgaser, Delrapport 1 i energimyndighetens och naturvårdsverkets underlag till Kontrollstation 2004.

Strzoda R. (2008) Skriftligt PM om teknisk specifikation med information om möjligheterna att utöka mätsträckan för Siemens lasersystem för gasdetektering med förstärkt reflektorenhet, SIEMENS, Munchen 2008-02-21.

Tolyamat T., Kreuss F., Carson D. and Davis-Hesser W. (2004) Monitoring Apparatus for Landfill Bioreactors, USEPA/600/R-04/301.

Wall D. K. and Zeiss C. (1995) Municipal landfill biodegradation and settlement, Journal of Environmental Engineering, 121, 214-224.

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

BILAGOR

Detektering och kvantifiering av metangasläckage från deponier

Energi-Miljö-Säkerhet

Bilageförteckning:

1. Manual för användning av Siemens laserinstrument och FLIRs ThermoCAM™ GasFindIR LW
2. Technical Data for VOGUE Siemens AG, CT PS 8 Remote Natural Gas Leak Detector Field Unit
3. ThermoCAM™ GasFindIR LW
4. Valda undersökningsobjekt och deponiytor
5. Metoder att mäta koncentrationer och flöden av metangas
6. Fältobservationer, laserinstrumentet
7. Kammarmetodmätningar, resultat
8. Georesistivitetmätningar, starttider för mätningarna vid samtliga linjer
9. Geoelektricitetsmätningar, koordinater för alla elektroder
10. Geoelektricitetsmätningar, tidssteg
11. Fjärranalys för statusbestämning av avfallsupplag energi och miljötillämpningar

BILAGA 1

Manual för användning av Siemens laserinstrument och FLIRs ThermaCAM™ GasFindIR LW

1 ALLMÄNT

Denna vägledning är avsedd att användas för att bedöma metanavgång från avfallsdeponier. Att fastställa hur stora metanemissioner från en deponi är, samt få information var läckagen förekommer inom en deponiyta är viktig information för deponiägare med ansvar för yttre miljö och drift av gasuttagsanordningar på deponin.

Här har valts en metodik som utgår från användning av ett handburet laserinstrument för detektering av metankoncentrationen ovan en deponiyta. Inom projektet har använts Siemens AG CT PS 8 laserinstrument som är speciellt konstruerat för att mäta metankoncentrationen i luft.

För att fastställa storleken på metanemissionen krävs att mätningarna med laser enligt denna manual kompletteras med ytaavgångsmätningar med kammarmetoden eller annan metod.

Manualen är uppdelad i följande delar

- Beskrivning av laserinstrumentet
- Emissioner av metan från deponiytor
- Syften med emissionsundersökningar
- Inledande genomgång
- Fältmätning, scanning
- Fältmätning, detektering och inmätning
- Sammanställning av mätresultat

Manualen är avsedd att användas för

- Detektering av metanemissioner från ytor på avfallsdeponier
- Detektering av metanemissioner från installationer, t ex gasbrunnar

Metodiken kan användas både för deponier med system för uttag av deponigas och deponier som inte har utbyggt och driftsatt deponiuttagssystem.

Metan är en luktlös, ej synlig gas som bildas i en deponi där avfallet bryts ned anaerobt tillsammans med koldioxid. Gaserna bildas med ungefär lika delar metan och koldioxid. Med gasblandningen som i detta sammanhang kallas deponigas kan andra gaser finnas i små mängder. Bl. a förekommer svavelväte, merkaptaner ofta i deponigasen vilka ger deponigasen oangenäm lukt.

En undersökning med syftet att detektera metanemissioner kan delas i två delar

För direkta fältmätningar görs en inventering av deponins delar och den information samlas in som behövs för fältmätning och sammanställning.

Första steget i en fältmätningen av metanemissioner utförs för att identifiera stora felaktigheter som rör gasuppsamlingen. Denna bör fungera på avsett sätt. I det första steget ingår att undersöka om de finns stora metanläckage som kan påverka den heltäckande ytskanning som utförs i andra steget. Sådana platser kan bestå av tippsåret, grävning i avfallet i något avsnitt av deponin. Undersökningen i den första steget görs med laserinstrumentet.

Därfter kan en detektering genom en yttäckande ytskanning efter oönskade metanemissioner påbörjas. Denna görs med laserinstrumentet som kan detektera metankoncentrationen i atmosfären direkt, vanligen uttryckt i ppm x m, för att därigenom indikera förekomst av metanläckage.

2 INSTRUMENTET

För tillfället finns endast fåtal instrumenttyper att tillgå som är direkt användbara för mätning av metan i luft på det sätt som beskrivs här. Det kommer dock troligen att finnas flera laserinstrument i framtiden som kan mäta metankoncentrationen i atmosfären ovan en deponi.

I det följande redogörs för hur Siemens laserinstrument fungerar och arbetar. Avvikelser mot andra instrument finns, men i huvuddrag kommer egenskaper, arbetssätt etc. troligen vara desamma. Med ett instrument medföljer alltid en manual som beskriver dess handhavande. Läs alltid manualen till det specifika laserinstrument som skall användas.

Laserinstrumentet avläser metankoncentrationen längs en strålgång. Laserstrålen skickas ut från instrumentet och returneras (eg. backscatter=återstrålas) från den bakgrund den träffar. Den returnerade delen av laserstrålen registreras i en fotosensor, och denna signal översätts till metankoncentration längs strålgången. I instrumentet registreras således koncentrationen i ppm x m. Om strålgångens längd kan mätas erhålls metankoncentrationen i ppm om ppm x m-värdet delas med 2 ggr strållängden. Det erhållna ppm-värdet är ett medeltal av metankoncentrationen längs strålgången.

Som hjälp vid mätning med instrumentet finns en synlig laserstråle (peklaser) som markerar strålgångens väg.

Instrumentet är ett handhållet instrument med låg vikt, ca 1,5 kg. Det är lätt att peka med instrumentet i olika riktningar.

Obs! Laserstrålen får inte riktas mot solen, då kan fotodetektorn skadas. Undvik den kon som bildas 30° runt solen.

Registrering av ppm x m-värden sker 10 ggr per sekund, dvs. mätningen är mycket snabb. En skärm visar dels aktuellt värde samt ett koncentrations-tidsdiagram där de senaste 16 sekundernas mätta värden visas.

Instrumentet är försett med utgång för överföring av data till extern logger.

Samtidigt visas:

- a) Varning när batteriet börjar bli svagt, 10-20 minuter före automatisk avstängning.
- b) Indikation på lasertemperaturen, om den är för låg eller hög
- c) Indikation på att laserns våglängd inte är låst till den för metan kan förekomma om till exempel instrumentet tas från inomhustemperatur till kall utomhustemperatur
- d) Indikation som visar om för mycket laserljus reflekteras från den reflekterande ytan, instrumentet visar då noll.
- e) Indikation om för mycket ljus kommer in till fotodetektorn från en extern ljuskälla. Instrumentet visar då noll.

Efter att laserinstrumentet slagits på med gula on/off-knappen är instrumentet klart att användas efter 10 till 20 sekunder. Peklasern kan sättas på och stängas av med röda knappen efter behov när instrumentet är påslaget. Obs! peklasern tar ganska mycket energi från batteripacket och bör användas främst vid detaljerad mätning med lasern riktad direkt mot läckagekällan, eller i samband med mätning på långa avstånd mot en reflektoryta.

I fält visar instrumentet värden i ppm x m. Ett brus finns som är tydligt vid låga ppm x m-värden. Upp till 10 m avstånd till reflekterande yta är bruset utomhus ca 10 ppm x m och kan öka till ca 200 ppm x m på längre avstånd.

Räckvidden hos instrumentet är ca 30 m. Med en reflektor som bakgrundsytan kan mätning utföras på mycket längre avstånd, upp till 200 m. Vid mätning mot högre reflekterande material släcks instrumentet och visar noll, detta på grund av att intensiteten i reflekterat ljus blir för stor.

3 INLEDANDE GENOMGÅNG

Inledningsvis tas uppgifter fram om deponiytans beskaffenhet. Den totala ytan delas in i delytor. En delyta bör vara en yta med relativt lika förutsättningar för deponigasemission där faktorer som yttäckning lutning är densamma inom hela delytan. Till vägledning kan sägas att en uppdelning i överytor, slänkrön, slänter, slänthot är fördelaktig. Överytor kan ha olika täckning och kvalitet på täckning i olika delar, en uppdelning är fördelaktig att göra, samma uppdelning bör göras vad gäller slänter.

Äldre avfall har inte så hög gasproduktion som nyare avfall. Sättningarna är större inom delar med nyare avfall vilket kan göra att yttäckningen är utsatt för stora påfrestningar. Risken för läckage är sammantaget större om deponidelen ifråga innehåller nyare avfall. Med nyare avfall menas avfall som är mindre än tio år gammalt. Vid indelningen i delytor bör det således tas hänsyn till avfallets ålder.

Slänthot är utsatta delar av en deponi, dels för att de utsätts för vind och dels för att täckningen ofta är svår att åstadkomma på ett tillfredsställande sätt på slänthot.

Slänthoten är liksom en från metanläckagesynpunkt känslig del då vallars undre delar kan vara genomsläppliga för gas samt att lakvattensystem ofta också kan leda ut deponigas från de undre delarna av en deponi.

Information samlas således rörande:

1. Avfallsdeponins hela yta
2. Delytor som kan antas ha olika egenskaper från emissionssynpunkt. En delyta skall bestå av den yta som kan antas ha likartad täckning etc. inom hela ytan.
3. Installationer som kan tänkas ge metangasemission

Lämplig indelning är

- a) överytor, god täckning (med god täckning menas här ≥ 1 m täckning med jord)
 - b) överytor, ej tillfredsställande täckning, < 1 m täckning, eller synligt avfall i ytan
 - c) Slänter, täckta åtgärdade slänter, > 1 m täckning med jord, utan erosionsskador
 - d) Slänter, ej utjämnade tillräckligt täckta slänter, < 1 m täckning, uppstickande avfall
 - e) Släntkrön
 - f) Släntfot
 - g) Mark vid gasbrunnar, gasbrunnar och ledningar på deponin
 - h) Brunnar ingående i lakvattenuppsamlingssystemet
4. Driftsituationen för deponigasuttagssystemet, följande inventeras
- a) Deponigasuttagssystemets utformning, vilka delar av deponin har aktivt gasuttagssystem. En ritning som visar uttagssystemets delar skall ingå i förstudien. Var finns uttagsbrunnar, var är reglerstationer, och var och hur övervakas deponigasuttagssystemet.
 - b) Uttaget vid mätning i m^3/h eller annat mått
 - c) Kontroll mot för anläggningen normala värden
 - d) Inventering om någon del av uttagssystemet är avstängt

Ett aktivt tipsår innebär ofta stor metangasemission i och med att deponiytan saknar täckning. Numera deponeras organiskt avfall endast i undantagsfall och risken för stort metangasläckage är då mindre, eftersom det inte förekommer färskt avfall nära ytan i tipsåret.

Det ovan nämnda sammanställs. Sålunda skall huvuddragen i deponigasuttagssystemet redovisas, uppdelningen i delytor där varje delyta är karakteristisk från emissionssynpunkt.

4 FÖRBEREDANDE FÄLTUNDERSÖKNING OCH MÄTNING

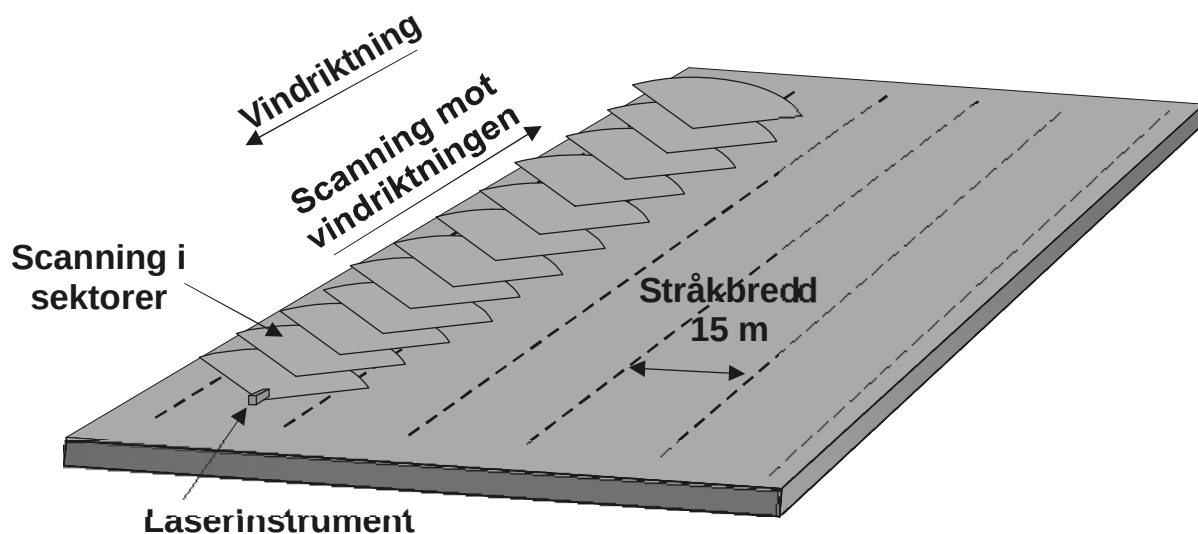
Före den yttäckande skanningen genomförs en orienterande undersökning i fält för att se om delytorna valts ut rätt. Samtidigt används laserinstrumentet för att se om höga koncentrationer påträffas vid tipsår, ställen där grävarbeten förekommer, lakvattenbrunnar eller andra platser eller ytor där stora läckage kan förekomma.

Genomgången med mätning genomförs för att känna till var stora metanläckage finns inför den detaljerade ytskanningen.

5 YTTÄCKANDE SCANNING

Undersökning inleds med en yttäckande scanning över alla delytor. Varje delyta scannas var för sig.

Laserinstrumentet (1 st. instrument) förs i svepande rörelser fram och tillbaka så att strålgången träffade markyta 10-15 m framför observatören. Observatören har på förhand gjort upp stråk så att laserinstrumentet förs i de svepande rörelserna framåt mot vinden, se arbetsprincipen i [figur 15.1](#). Där koncentrationer över bakgrunds nivåerna erhålls intensifieras svepningen i den riktning som de högre koncentrationerna erhålls, samtidigt som observatören går i riktningen fram till läckagekällan. Läckaget markeras med en käpp för senare noggrann inmätning.



Inmätning av läckagekällan på följande sätt:

- Markering av läckageplatsen
- Inmätning av läckageplatsen. Beroende på vilken noggrannhet som krävs väljs att markera direkt på ritning som används direkt i fält, eller lägesbestämning med hjälp av GPS.
- Mätning med instrumentet nära källan. Med koncentrationsnivån som grund bestäms på vilket avstånd som läckaget skall mätas. Vid 0,5 m mäter instrumentet direkt i ppm. Vid en första skanning räcker det att mäta i instrumentets ppm x m, men då skall registrering ske på samma avstånd från läckaget i alla punkter så att en jämförelse mellan punkterna kan göras. På grund av att metangasen mycket snabbt blandas med luften, samt att metan också kan komma från andra läckage än den där den aktuella registreringen sker, bör avståndet vara relativt kort, 30-50 cm.
- En läckageplats kan bestå av läckage ur synlig spricka i täckningen på deponin, enstaka punkter (som också kan vara osynliga sprickor, läckage vid uppstickande avfall, etc). Läckaget kan också komma från marken nära en gasbrunn

Utifrån ytskanning erhålls:

- a) Information om antal läckagepunkter inom en delyta
- b) Läge för varje läckagepunkt
- c) Koncentrationsnivån av metan ovan varje läckageplats, detta är ett relativt mått som inte kan översättas direkt till flödesmått.

6 SAMMANSTÄLLNING AV RESULTAT

Resultaten av fältmätningarna sammanställs på ritning där platserna för detekterade metanemissioner förs in. En analys genomförs där delytorna med stora eller många metanläckage markeras särskilt. I detta läge görs kontroll om gasuttagssystemet i de markerade delarna varit i normal funktion (om gasuttagssystem finns). De markerade delarnas yttäckning kontrolleras. Förslag till åtgärder tas fram för ytor med oacceptabelt metanläckage.

7 ÅTGÄRDER OCH EFTERKONTROLL

Åtgärder t ex i form av kompletterande yttäckning bör följa upp genom att en ny ytskanning genomförs. Åtgärderna kan medföra att gasläckaget flyttas, därför bör den nya ytskanningen genomföras även på intilliggande delytor.

FLIRs ThermoCAM™ GasFindIR LW (förkortad till FLIRs IR-GasFinder i manualen).

FLIRs IR-GasFinder är en värmekamera med en detektor med ett spektralområde känslig för bl.a. metangas. Värmekameran är i likhet med alla IR-system temperaturberoende vilket innebär att det för att kunna registrera och avbilda metangas krävs en temperaturskillnad mellan gasen och omgivande luft/objekt på ≥ 2 °C. Gränsen för detekterbar metangas relativt den för Siemens laser detekterbara metankoncentrationen har i det aktuella projektet fastställts till ≥ 2000 ppm, beroende på delta T mellan metangasen och omgivande temperatur och vid för mättillfället rådande väder- och utstrålningsförhållanden.

FLIRs IR-GasFinder är ett handburet system som detekterar och visualiserar metangas inom det långvågiga spektralområdet, 10-11µm, vid en operativ temperatur inom intervallet -15+40 °C. Normallinsen är 50 mm (11°) med kompletterande linser på 25 respektive 100 mm. Mätdata lagras digitalt på en liten handburen DVD- och display-enhet.

Instruktioner om inställningar och kalibrering av systemet före och under fältmätning

1. Vid fältmätningar bör beaktas att IR-GasFinder-systemet kan ställas in i tre känslighetslägen eller temperaturområden. I början av fältmätningen prövar sig operatören fram och väljer det temperaturområde som ger bästa termiska och geometriska upplösning för tillämpningen. Under pågående fältmätning av metanemissioner från t.ex. en avfallsdeponi kan väder- och utstrålningsförhållandena samt temperaturvariationer

mellan metangasen och omgivningen förändras vilket innebär att operatören under mätningen kan behöva ställa om till ett annat av de tre känslighetslägena.

2. **Obs!** IR-GasFinder-systemet har en inbyggd referens för intern kalibrering av detektorn. För att bibehålla en optimal och stabil termisk och geometrisk upplösning så bör operatören med jämna mellanrum utföra en manuell kalibrering. Detta görs genom att operatören sätter på linskyddet på linsen och genom en knapptryckning utför en kalibrering där den svarta insidan på linsskyddet fungerar som en svartkroppsstrålare mot vilken detektorn kalibreras.
3. Inställning av skärpedjupet på linsen görs manuellt av operatören. Det är viktigt att operatören gör en justering av bildskärpan mot ett stabilt objekt/yta innan och när man byter fokus. Detta görs genom att man fokuserar på ett objekt eller deponiyta som ligger på längre avstånd från kameran än vid starttidpunkten för fältmätningen.

Notera, infraröd teknik är till skillnad från laserteknik inte avståndsberoende, men väl temperaturberoende, enligt ovan. Detta innebär att IR-GasFinder-systemet kan registrera och visualisera metanemissioner, följa och studera spridningsbilden på ett metangasmoln på långt avstånd från värmekameran, detta förutsatt att delta T mellan metangasen och omgivningen är tillräckligt stor, $\geq 2\text{ °C}$, och att framförallt vindförhållanden är sådana att gasen inte snabbt omblandas med omgivande luft.

4. IR-GasFindern kan antingen användas handburet av operatören, eller monteras på ett stabilt kamerastativ och manövreras manuellt i horisontal- respektive vertikalled. Värmebildsdata i form av en rörlig värmebild kan studeras genom okularet på kameran eller i displayenheten på DVD-bandspelaren.

FLIRs IR-GasFinder system kan även monteras på en mast på en bil eller på en helikopterplattform där kameraenheten styrs med en joystick-enhet inifrån fordonet. Manual för bil- och flygburna tillämpningar behandlas inte här.

5. Värmebildsdata lagras digitalt på DVD-enhet för redigering, analys och utvärdering efter fältmätningen utförts. Lagrade rörliga värmebildsdata kan presenteras som videofiler eller som frysta bilder selekterade ur videosekvenser.

Instruktioner för handhavandet av IR-GasFinder vid fältmätning

FLIRs IR-GasFinder system kan användas separat för detektering, kartläggning och visualisering av gasemissioner från avfallsupplag eller som komplement vid mätning av Siemens lasersystem eller andra liknande gaslaser-mätsystem.

Mätförfarande:

- I likhet med Siemens lasersystem så inleds fältmätning för detektering och kartläggning av gasemissioner från avfallsupplag med att man skannar över den deponi eller deponiyta som man vill kartlägga emissionsstatus för. Efter skanningmomentet återvänder man till de objekt och ytor som bedöms som intressanta och kompletterar med en detaljerad mätning där man också efter bästa förmåga försöker detektera och följa metangasens spridningsbild från läckagekällan tills att metangasen omblandats med luften till en sådan koncentration att inte är detekterbar med GasFindern. I det fall man har tillgång till en laser typ Siemens lasersystem så utförs fältmätningen i omvänd ordning, där man först

skannar området med lasern, utför detaljerad lasermätning och kompletterar med ett detekterings- och visualiseringsmoment med IR-GasFinder systemet.

- I fall med stora metanemissioner används IR-GasFinder systemet företrädesvis för att lokalisera läckagekällan, studera spridningsbilden och ge underlag för detaljerad mätning av metankoncentrationen med Siemens Lasersystem.
- Detektering och visualisering av metanemissioner från gasuttags- och lakvattensystem utförs genom att operatören placerar sig vertikalt mot vindriktningen och det förmodade gasläckageflödet från gasregler- eller lakvattenbrunnen. Man söker ett optimalt avstånd mellan GasFinder-systemet och läckagekällan för att försöka fånga in och registrera spridningsbilden och spridningsförloppet för gasplymen, från läckagekällan till omblandning och upplösning av metangasmolnet med omgivande luft.

Erfarenheterna från användningen av kombinationen laser och IR-system indikerar att den bästa och operativt optimala lösningen för detektering och kartläggning av metanemissioner från avfallsupplag vore att i ett och samma system ha tillgång till både laser- och IR-teknologi och inbyggd GPS. Ett sådant system finns sedan slutet av 1980-talet utvecklat vid Laser Imaging System, LIS, Punta Gorda, Florida, USA. En manual för användning av systemet finns utarbetad men gäller enbart för stationära tillämpningar inom raffinaderier.

BILAGA 2

TECHNICAL DATA FOR VOGUE SIEMENS AG, CT PS 8 REMOTE NATURAL GAS LEAK DETECTOR FIELD UNIT

Laser operating wavelength	1651 nm
Laser output power	< 10 mW
Beam divergence	60 mm @ 10 m distance
Laser class	1
Visible laser wavelength	635 nm
Laser output power	<1 mW
Laser class	2
Response time	100 ms
Methane gas concentration range	Depending on reflected power 0..>1000 ppm ¹ . With raising reflected power the max. resolvable concentration decreases.
Power consumption	2.5 - 4 W depending mainly on ambient temperature
Operating time with one battery charge	3 - 5 hours with rechargeable cells (2000 mAh) depending on ambient temperature, with primary cells probably longer.
Operating temperature range	-10 +40 °C
Operating distance range	>10 m depending on reflecting surface
Lower detection limit	10 -20 ppm depending on reflected power

¹ When the concentration exceeds the max. resolvable concentration, the display shows the max. resolvable concentration as long as the concentration is higher

BILAGA 3.



ThermaCAM™ GasFindIR-SW



Specifikation:

Description

ThermaCAM™ GasFindIR allows you to detect gas leaks quickly and safely. ThermaCAM™ GasFindIR is capable of rapidly scanning large areas and hundreds of components. ThermaCAM™ GasFindIR is a real-time infrared camera for visualization of gas leaks. The camera is a rugged piece of equipment and is designed specifically for use in harsh industrial environments.

§ IR camera for real-time visualization of gas leaks § Trace leaks to its source § Reduced inspection time § Perform safer inspections § Lightweight, small rugged designed § Very good thermal sensitivity <35 mK @ 30°C (+86°F) § Allows you to detect methane and other volatile organic compound (VOC) gas leaks

Detects the following gases:

Benzene, Ethanol, Ethylbenzene, Heptane, Hexane, Isoprene, Methanol, MEK, MIBK, Octane, Pentane, 1-Pentene, Toluene, Xylene, Butane, Ethane, Methane, Propane, Ethylene, Propylene

Licensing and classification

License information Fixed (non-removable) lens version of the ThermaCAM™ GasFindIR requires US Department of Commerce License, except inside US.

Imaging and optical data

Lens mounting Fixed (non-removable) lens

Field of view (FOV) / Minimum focus distance 22° × 16° / 0.2 m (0.66 ft.)

Focal length 25 mm (0.98 in.) Spatial resolution (IFOV) 1.2 mrad

F-number 2.3

Thermal sensitivity/NETD 35 mK @ +30°C (+86°F) Image frequency Max 25 Hz

(PAL) Focus Manual Zoom 2× and 4× Digital Zoom

Detector data

Focal Plane Array (FPA) / Spectral rangeCooled InSb / 3–5 μ m IR
resolution320 × 240 pixels Sensor coolingStirling Microcooler (FLIR MC-3)
Well capacity18 e⁶

Electronics and data rate

Intergration type (electronic shutter speed)Snap shot Intergration
timeSelectable: 1–64 ms Read-out modesIntegrate while read Dynamic range12-bit
Full frame rate12.5, 25, 50 Hz (PAL)

Scene temperature range (50 Hz/60 Hz)

High (50 Hz/60 Hz) (power switch setting = 3)15°C to 65°C (59°F to 149°F)
Medium (50 Hz/60 Hz) (power switch setting = 2)40°C to 175°C (104°F to 347°F)

Low (50 Hz/60 Hz) (power switch setting = 1)–15°C to 15°C (5°F to 59°F)

Image presentation

InterpolationNone

Video outputRS-170 EIA/NTSC or CCIR/PAL composite video ViewfinderBuilt-in
viewfinder, 800 × 600, OLED, B/W External displayVia personal video
recorder

Storage of images

Image storage typeIncluded personal video recorder File formatsStandard
.avi or .asf video format

Video recording and streaming

Video recording typeRecording of video sequences to personal video
recorder.

Streaming type8-bit analog output

Data communication interfaces

Serial communication, purposeCommand and control Serial communication,
standardRS-232 Serial communication, connector type7-pin Fischer connector
Video, standardCVBS (ITU-R-BT.470 PAL/SMPTE 170M NTSC) S-video Video,
connector typeBNC (CVBS) 5-pin Fischer connector (S-video)

Power system

Battery typeNiMH

Battery voltage6 V

Battery capacity4.2 Ah

Battery operating timeApprox. 2 hours at +25°C (+77°F) ambient temperature
and typical use Charging systemIncluded battery charger (AC adapter or 12 V
from a vehicle)

Environmental data

Operating temperature range–15°C to +50°C (+5°F to +122°F) Storage
temperature range–40°C to +70°C (–40°F to +158°F) Humidity (operating and
storage)20–80% (non condensing) EMC§ EN 55011:1998 (Emission) § EN 61000-
4-2:1995 (Electronic Discharge) § EN 61000-4-3:1996 (Electromagnetic
Field Immunity) § EN 61000-4-3:1993 (Magnetic Fields)

Physical data

Camera weight, incl. lens and battery2.20 kg (4.85 lb.) Camera size (L × W
× H)262 × 158 × 132 mm (10.3 × 6.2 × 5.2 in.) Tripod mountingUNC ¼"-20

Scope of delivery

Packaging, contents§ ThermoCAM GasFindIR Camera § 25 mm lens cap §
Optical cleaning kit § Neck strap § Battery charger, 2 ea.
§ NiMH battery, 3 ea.

§ User's Manual
§ Hard transport case
§ S-Video cable
§ Video cable
§ Personal Video Recorder (PVR) and battery § A/V Cable for Personal Video Recorder

Administration
Revision 20438-251, 1.05

Supplies & Accessories

§ EXT-WAR-GCAM One Year Extended Warranty for InSb GasFindIR § 25147-210
GasFindIR upgrade to GasFindIR HSX § 03198-000 Cable-BNC 6FT § 14730-000
Cable-RS-232 Remote § 20981-500 Cable S-Video GasFindIR § 21466-000 A/V
Cable for Archos PVR § 21465-000 Personal Video Recorder § 17619-200 DR
11 NiMH Battery § 3301011 Hard Transport Case § 09289-200 Optical
Cleaning Kit § 17151-002 Battery Charger (NiMH)

VALDA UNDERSÖKNINGSOBJEKT OCH DEPONIYTOR

1 ALLMÄNT

Mätningar med VOGUE-laser och FLIR GasFindIR har utförts i Sverige på sex deponeringsanläggningar med gasutvinningssystem och en mindre deponi utan gasuppsamling. De valda anläggningarna har olika stor volym och utbredning och är olika vad avser gasgenerering och metanemission. Deponierna som har undersökts under olika årtider ligger i olika klimatområden i Sverige, se lokalisering i [figur 11.1](#). Fyra av deponierna har också kontrollerats med hjälp av kammarmetoden för bestämning av metanemissionens storlek.

Mätningar med laser och IR-teknik har också utförts vid två deponier i norra Frankrike. För dessa deponier utfördes heltäckande scanning, pinpointing av specifika metanläckage objekt samt kammarmetodmätningar.



Figur 11.1: Undersökta deponianläggningar i Sverige

2 SPILLEPENG AVFALLDEPONIER

De gamla delarna av Spillepeng, den regionala avfallsdeponin i Malmöregionen som ägs och drivs av SYSAV ligger vid strandlinjen i utkanten av Malmös hamnområde. De äldsta delarna ligger på land medan de nyare utgörs av invallade delar av Lommabukten, under havsytan. De äldre delarna är avslutade och har överlämnats till en stiftelse som sköter de avslutade områdena.

De äldre delarna har måttliga lutningar och har täckts med jordmassor med varierande tjocklek. Delarna har gasuttagssystem som varit i drift sedan 1983.

De invallade etapperna har fyllts från 1985 och framåt. Deponering pågår fortfarande. Före införandet av förbudet att deponera brännbart avfall bestod avfallet industriavfall, slam och askor. De olika avfallstyperna har deponerats i stora åtskilda celler. Volymerna som mottagit nedbrytbart avfall har gasuttagssystem. Den totala arean vid Spillepeng är ca 120 ha varav den nya delen utgör 55 ha.

3 SPILLEPENG TESTCELLER

Testcellerna vid Spillepeng utfördes inom ett forskningsprojekt som omfattade 12 testceller vid tre avfallsanläggningar i Sverige. (Samordnad deponigas, Forskning, Utveckling, Demonstration; RVF Rapport 97:7; ISSN 1103-4092). Projektets mål var att optimera nedbrytningen av avfallet och därmed deponigasproduktionen. De sex cellerna placerades ovanpå äldre avfall inom de landbaserade delarna av Spillepeng. Alla celler hade en kvalificerad bottentätning, lakvattenuppsamlingssystem samt gasuppsamlingssystem. Totalt 25 350 ton deponerades i cellerna under 1988 och 1989, med olika typer av avfall för att studera betydelsen av sammansättningen på avfall relativt gasproduktionens storlek. Alla cellerna täcktes med 0,5 moränlera med en yttäckning av 0,3 m matjord.

Gasbildningstakten i cellerna var under undersökningsperioden 1990-1995 (fyra år) 39-71 m³ biogas/ton normaliserat till 50 % CH₄.

Sättningarna i avfallet har efter täckning av cellerna varit betydande. På sommaren 2006 samt på våren 2007 förnyades täckningen på alla celler då sätningarna med tiden brutit upp det ursprungliga täcklagret och gjort gasuttagssystemet obrukbart. Gasuttagssystemet byggdes samtidigt om.

4 FILBORNA AVFALLSANLÄGGNING

Deponin vid Filborna avfallsanläggning ägs och drivs av NSR AB i Helsingborg. Deponering på platsen startades 1951 med hushållsavfall från Helsingborgs stad. Speciellt för denna deponi är att de yttre slänterna består av en vall av jordmassor. Av deponivolymen, totalt 11 Mm³, består uppskattningsvis 4-5 Mm³ av jordmassor.

Deponin har rektangulär form med relativt branta ytterslänter och en överyta med svaga lutningar. Deponin är ca 45 m ovan grundplanet och omfattar 35 ha.

Deponin med en tillförsel under 2006 och 2007 omfattande ca 70 000 ton årligen av blandat hushålls- och industriavfall. Denna gamla del kommer att avslutas 2008. Under 1990-talet tillfördes ca 200 000 ton/år. Sedan lång tid har nytillfört avfall lagts ovanpå det äldre deponerade avfallet. Efter 1990 har allt avfall deponerats i avgränsade celler.

Uttag av deponigas startades 1985. För närvarande tas ca 1800 m³/tim ut. Uttaget var som störst under 2004 då med ca 2200 m³/tim, för att sedan sakta avta. Uttaget görs genom horisontella dräner inom cellerna samt vertikala brunnar ned till ca 20 m djup. Det vanligaste problemet med gasuttagssystemet består av vatten i deponin som blockerar uttagsbrunnar och samlingsledningar. Nya kompletterande brunnar sätts ungefär vart femte år för att kunna bibehålla en hög uttagsnivå.

Deponigasen används för produktion av elektricitet samt produktion av fjärrvärme ingående i Helsingborgs fjärrvärmenät. Den totalt installerade effekten är ca 20 MW.

Cirka 10 ha av Filbornadeponin har slutlig täckning. Den del där deponering sker idag omfattar 4 ha. Resten av ytorna utgörs av intermediär täckning, lagringsytor för jordprodukter etc.

Fyra celler har täckning med plastduk. Avfallet i dessa celler har lagts in 2001-2005, dvs. relativt färskt avfall.

5 HAGBY AVFALLSANLÄGGNING

Hagby avfallsanläggning är lokaliserad i Täby kommun i norra Storstockholm. Anläggningen inklusive ytterligare en stor deponi (Löt) drivs av SÖRAB. Avfall har deponerats på platsen sedan 1960. I början var deponin lags i en sluttning på fast mark men sedan 1970 har en våtmark utnyttjats i anslutning till den äldre deponin. Deponiytan är totalt 49 ha. De två stora delarna etapp I och II omfattar 3 Mm³ avfall.

5.1 Etapp I

Etapp I har en höjd av ca 10 m ovan basplanet. Den avslutades 1977 och är täckt med 0,5-1,5 m osorterade jordmassor. Alla delar har täckande vegetation och det växer tallskog på stora delar av deponin. Markvegetationen utgörs av gräs.

Etappen har ett uttagssystem för deponigas som varit i drift sedan 1977.

5.2 Etapp II

Etapp II utgörs av deponidelen som ligger i våtmarken. Den omges av stora invallningar av krossten som sjunkit ned i våtmarkens underlagrande lösa leror för att öka deponins stabilitet. Krosstenen fungerar på samma gång som lakvattendränering. Deponin har flacka lutningar och omfattar totalt 22 ha. Deponin fylldes med avfallet mellan 1977 och 1995.

5.3 Testceller E89 och E90

SÖRAB startade 1989 ett försöksprogram med syfte att optimera deponigasproduktionen. En cell, en s.k. energilimpa (E89), fylldes 1989 med 9000 ton krossat hushållsavfall. Lakvattnet recirkulerades och uppvärmdes före det att det återfick infiltrera i avfallsmassorna. Deponigasproduktionen kom igång snabbt och var initialt mycket stor. En ny reaktor igångsattes 1990 men utan uppvärmd lakvattenrecirkulation.

Bägge cellerna är täckta med lågpermeabel torv, en plastduk samt jordmassor till en tjocklek av 0,5-1,0 m tjocklek.

6 LÖTS AVFALLSANLÄGGNING

Avfallsanläggningen Löt är belägen mellan Stockholm och Norrtälje, 40 km norr om Stockholm. Anläggningen öppnades 1995 av SÖRAB som en ny stor avfallsanläggning för norra Storstockholm.

Deponering av brännbart avfall förbjöds i Sverige 2002 och deponering av organiskt avfall 2005. Deponering av avfall har på grund av detta minskat väsentligt vid Löt.

Deponin som utnyttjats i dessa undersökningar består av en 6 ha stor och 25 m hög deponi där industriavfall deponerats. Den sammanlagda avfallsvolymen är 380 000 m³. Slänterna är relativt branta och inte helt utjämnade. Den norra slänten är utjämnad och täckning har pålagts. Den plana överytan är liten i förhållande till släntyterna. Överytan är täckt med ca 1 m jord.

Deponidelen har 2006, det vill säga under undersökningstiden försetts med ett uttagssystem för deponigas.

7 HÖGDALA AVFALLSUPPLAG

Deponering vid Högdala påbörjades i slutet av 1960-talet. Deponiområdet var då mindre och utvidgningen skedde under 1970-talet. Från och med 1999-01-01 har all mottagning och deponering av avfall upphört på Högdala avfallsanläggning. Tillförda mängder 1988-1999 framgår av tabell 11.1. Dock har jordmassor mottagits och lagrats för att användas till sluttäckning av deponin. Deponin sluttäcktes 2000-2001.

Vid SITAs kontor i Solna saknas mängder från 1970- och 1980-talet, varför uppgifter för den perioden saknas i redovisningen nedan. Från deponins start har förutom industri- och hushållsavfall också askor deponerats.

Tabell 11.1: Tillförda mängder, Högdala avfallsanläggning

	Industri (m ³)	Hushålls (m ³)	Lera (m ³)	Gallerrens (m ³)	Schaktmassor (m ³)	Sot (m ³)
1988	493400	41100		1100	9000	
1989	526200			800	4700	550
1992	488100	5900		800	7608	
1993	386147	6750		836	10590	
1994	367852	3120	10000		6444	
1995	293286	60			5740	
1997	122446	0	0		9183	
1998	137918	0	0		26311	
1999*					50000	

*Mottagning och deponering av avfall har upphört.

Deponin har gasuttagssystem. Den uttagna gasen facklas.

8 FORSBACKA AVFALLSANLÄGGNING

Forsbacka avfallsanläggning är belägen mellan Gävle och Sandviken 170 km norr om Stockholm. Ordnad deponering påbörjades 1975 vid en gammal deponi omfattande 5,8 ha. Den del som nu används är från 1984 (16 ha). Avfallet som deponerats består av blandat hushålls- och industriavfall. Efter 2002 har mängden deponerat avfall gått ned avsevärt och den årliga tillförseln är numera ca 10 000 ton/år av obrännbart, oorganiskt avfall. Höjden på deponin är ca 17 m.

Deponin har relativt branta slänter, som inte till alla delar är tillfredsställande täckta. I öster är överytan flack, i övrigt lätt kupad ned mot slänterna. Den västra delen är ytavjämnad och försedd med täckning med jordmassor och avloppsslam. Ungefär 1,5 Mm³ finns deponerade i den modernare delen av deponierna.

Deponigas tas omhand i ett uppsamlingssystem och används för elproduktion.

9 ÄNGLARPS AVFALLSANLÄGGNING

Änglarps avfallsanläggning är belägen söder om Svenljunga samhälle i Svenljunga kommun. Vid anläggningen finn en deponi som varit i drift sedan 1960-talet. Deponin omfattar två delar

Äldre del, inte i drift

Yta: 5 ha

Genomsnittlig upplagshöjd: 4 m

Lägsta plushöjd: + 160 m

Högsta plushöjd: +177 m

Upplagd volym avfall: 200 000m³

Typer av avfall: Hushållsavfall, industriavfall, avloppsslam, aska från fastbränsleeldning

Nuvarande upplag i drift

Yta: 2,5 ha

Genomsnittlig upplagshöjd: 6 m

Lägsta plushöjd: + 157 m

Högsta plushöjd: + 169 m

Upplagd volym avfall: 150 000 m³

Typer av avfall: Hushållsavfall, industriavfall, avloppsslam

Den avställda delen används nu till kompostering av trädgårdsavfall, lagring av träflis, och skrot.

Den del som nu används domineras av en slamlagun där slam från ett garveri deponerats.

10 FRANSKA UPPLAGET 1

Deponin F1 är belägen i norra Frankrike. Deponin startades 1975 och fyllning pågår fortfarande. Den är uppdelad i tre zoner som är helt sammanbyggda. Uppgifter om de tre zonerna framgår av tabell 11.2.

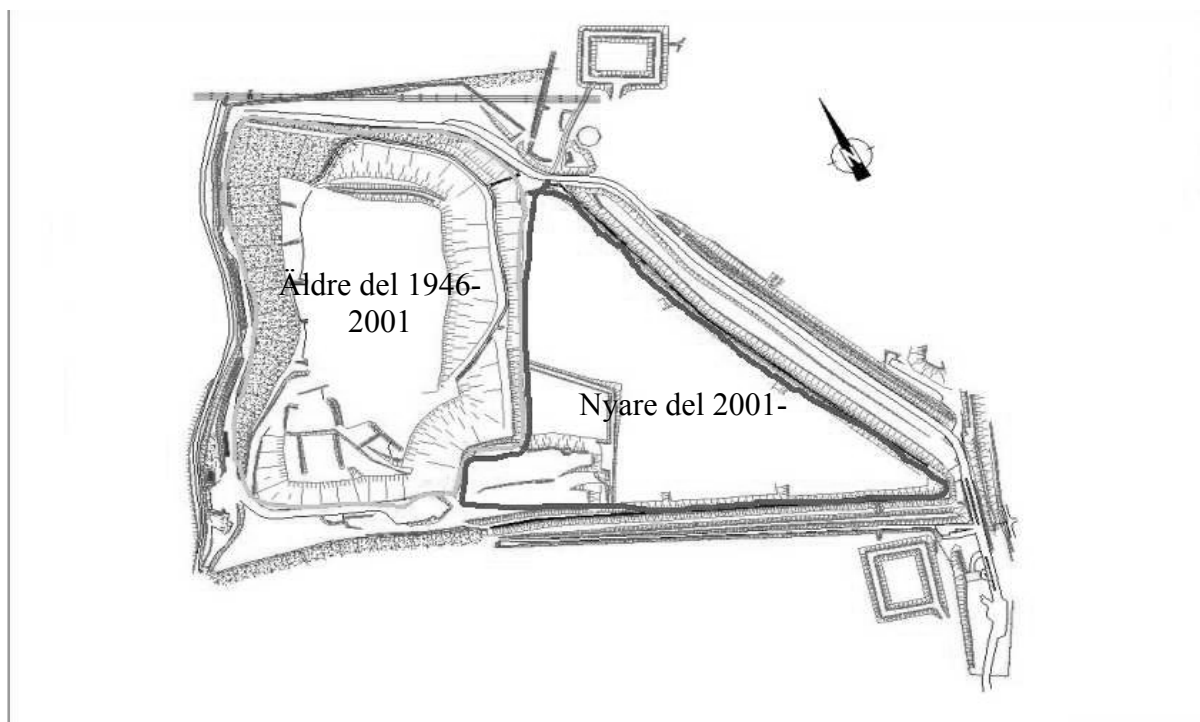
Tabell 11.2: Areal, avfallsmängder mm zon 1-3 F1, Frankrike

Zon	Areal, ha	Deponerade mängder, ton	I drift år	Täckning
1	6,2	400 000	1975-1990	0,5 lera
2	4,2	260 000	1975-1990	0,5 m lera och 1 m jord
3	6,3	640 000	1990-2005	1,0 m lera och veg. skikt
Utvidgning	1,0	225 000	2005-	

Det finns inga uppgifter om vilka mängder som deponerats före 1991. Uppskattning av deponivolymen för denna tid ger dock att 35 000-47 000 ton tillförts varje år. Under tiden 1991-2006 har i medeltal ca 70 000 ton hushålls- och industriavfall tillförts. Den övervägande delen har utgjorts av hushållsavfall.

Deponigasset består av 60 vertikala brunnar inom de tre zonerna. Gasen används inte utan facklas i en BG 2000 fackla placerad centralt på deponin. Varje månad insamlas ca 800 000 m³ deponigas vilket motsvarar 9,6 Mm³ per år. Metanhalten är 30-35 %.

Emission av metan har utförts 2005 med FID och kammarmetod. Resultatet av denna mätning visas i figur 11.2.



Figur 11.3: F2, situationsplan. Den nyare delen är till del utfylld nu år 2008.

METODER ATT MÄTA KONCENTRATIONER OCH FLÖDEN AV METANGAS

1 ALLMÄNT

Det finns ett stort antal metoder för att mäta metangas. Detta kapitel har skrivits för att systematisera metoderna och få en överblick över använda metoder efter användningssätt. Nedan beskrivna metoder är etablerade eller under utveckling.

Vilka metoder som är användbara beror mycket på vilka kriterier som uppställs. Dels har operatören som driver, eller har ansvar för en avfallsdeponi krav, och dels kan det finnas kriterier som uppställs av myndigheter av olika skäl.

När det gäller avfallsdeponier har ännu inte några kvalitativa eller kvantitativa utsläppsgränser uppställts från myndighetshåll.

Teknik och metoder för detektering och kvantifiering av metan från avfallsdeponier kan delas upp enligt följande (Envirotech Engineering 2007):

1. Metoder för upptäckt av punktutsläpp, koncentrationsmätning
2. Metoder för kvantifiering av läckagestorlek
3. Metoder för områdesmätning, både läckdetektering och kvantifiering

Det kan sägas att metoderna för upptäckt av punktutsläpp är de som tagits fram inom naturgasindustrin för att mäta främst läckage från huvudledningar, primärnät och lokala ledningsnät, sekundärnät. De mätmetoder som finns för mätningar över stora områden täcker delar av en deponi eller hela deponin.

2 DETEKTERING AV PUNKTUTSLÄPP GENOM KONCENTRATIONS MÄTNING

Metoderna för detektering kan delas upp i:

1. Punktdetektering nära källan (close range detection)
2. Fjärranalysmetoder (remote sensing)
3. Flygburna system (airborne methods)

Även här har indelning av metoderna tagits från naturgas - petroleumindustrin. Dessutom har metodernas tillämpning inom avfallsindustrin lagts till och dess värdering lyfts fram.

Generellt bör ett instrument som skall används för detektering ha följande egenskaper (Envirotech Engineering, 2007):

- stabil och noggrann registrering på ppm-nivå, och helst också på "procentnivå".
- snabb responstid

- vara specifikt inställd för metan, utan registrering av andra gaser
- vara Ex-klassificerad
- tåligt ytterhölje
- tåla dåligt väder och damm
- hållbar drift
- stabila inställningar
- lätt att underhålla
- skall kunna användas av en operatör utan lång utbildning
- ha låg anskaffnings - och driftkostnad

Mätmetoderna för detektering och mätning nära punktkällan är

1. Flamjonisering
3. Katalytisk förbränning
4. Solid State (SS)
5. Infraröd absorbtion (IR)
6. Tunable Diode Laser Absorbtion Spectroscopy (TDLAS)
7. Bubbeltest
7. Vegetationsförändringar
8. Akustisk detektering

Fjärranalysmetoderna är

1. Passiv IR Gas Imaging - Termisk visualisering
2. Passiv IR Gas Imaging - Multi-Spectral visualisering
3. Öppen strålgång - Tunable Diode Laser Absorbtion Spectroscopy (TDLAS)

Luftburna system använder mätmetoderna

1. Tunable Diode Laser Absorbtion Spectroscopy (TDLAS)
2. Differentiell absorbtion LIDAR
3. Passivt Gasfilter korrelationsradiometri

Flamjonisering (FID)

Tekniken går här inte igenom i detalj. Som namnet säger mäts joner som bildas när kolväten är närvarande. Flamjonisering kan användas för att detektera metan. Vid högre koncentrationer än 50 000 ppm kan instrumentet släckas ut. Instrumentet kräver uppvärmningstid. Som vid många instrument där gas fångas in kan instrumentet bli obrukbart om vatten kommer in med gasen.

Flamjonisering används vid kartering av punktutsläpp på avfallsdeponier. Det finns instrument som kan bäras. Ett företag har kombinerat FID-detektorn med en GPS, så att registrering kan ske av position och koncentration samtidigt.

Katalytisk förbränning

Katalytisk förbränning är den mest ursprungliga metoden som finns för att mäta t ex. metankoncentration. Metoden används mest för stationära mätställen men mäter mycket snabbt.

Termisk konduktivitet

En fysisk metod som inte inbegriper någon kemisk reaktion och kan mäta inom hela området 0-100 % t ex. metan, än ej med hög noggrannhet.

Semikonduktor (Solid State)

Även semikonduktor kan mäta metan i ppmv direkt, även låga halter. Den kan t ex. användas vid "sniffning" över en deponiyta. Andra gaser kan dock påverka mätresultatet.

IR

Metoden bygger på principen att en gas absorberar infraröd strålning vid definierade våglängder. Ju mera absorberande gas som är närvarande, ju mera IR-ljus blir absorberat. En detektor kan mäta intensiteten i det gasutsatta IR-ljuset och jämföra det med den ursprungliga källan. Metoden kan mäta inom hela mätområdet från ppm-nivå till 100 %.

TDLAS

Koncentrationsmätning av t ex. metan med laser. Gasblandningen pumpas in i instrumentet och laser mäter i en cell som innehåller gasen eller en blandning. Våglängden ställs in på absorptionsintervallet för metan och koncentrationen beräknas genom mätning av den del av laserstrålen som transmittas genom gasblandningen.

Bubbeltest

Ett skum sprutas över ytan där ett läckage misstänks. Nya bubblor uppstår där läckaget finns. Detta används framförallt vid hopskruvning av ledningar för att kontrollera tätheten.

Vegetationsförändringar

Gas som strömmar ut från en avfallsdeponis inre genom ytan innebär att det ofta inte finns någon naturlig markluft. Ytor som vanligtvis skall vara vegetationsbeksidda kan på platser där deponigasen strömmar ut då sakna vegetation. Avsaknaden av vegetation indikerar sålunda gasutströmning och detta kan användas för att indikera gasläckage. Metoden används som indikator, någon direkt mätmetod är det inte. Bergman et al. har visat att vegetation som gasindikator kan delas upp i a) områden med ingen vegetation alls, b) områden med torr eller skadad vegetation (gula blad som exempel), och c) stor variation mellan exemplar av samma art inom ett område på en deponi (Maurice et al, 1995).

3 METODER FÖR KVANTIFIERING AV GASLÄCKAGE

Det finns inte så många metoder för att kunna kvantifiera ett specifikt gasläckage. De som nämnts i litteratur är

1. Inneslutning
2. Rotameter eller annan flödesmätning

Inneslutning

Inneslutning görs mestadels på utrustning. En plastsäck fås att sluta tätt kring den plats där läckaget misstänks. Säcken förses med kontrollerat utlopp. Ett känt flöde av en inertgas leds in i säcken. Metankoncentrationen mäts sedan vid utloppet och flödet kan beräknas. Metankoncentrationen kan till exempel mätas med FID.

Rotameter eller annan flödesmätning

Denna typ av flödesmätningssmetoder för gas används vid strömning i slutna rör. Deponigas mäts ofta med V-konmätare då denna ej påverkas av partiklar i gasen

4 METODER FÖR KVANTIFIERING AV LÄCKAGE FRÅN STORA YTOR, DELAR ELLER HELA AVFALLSDEPONIER

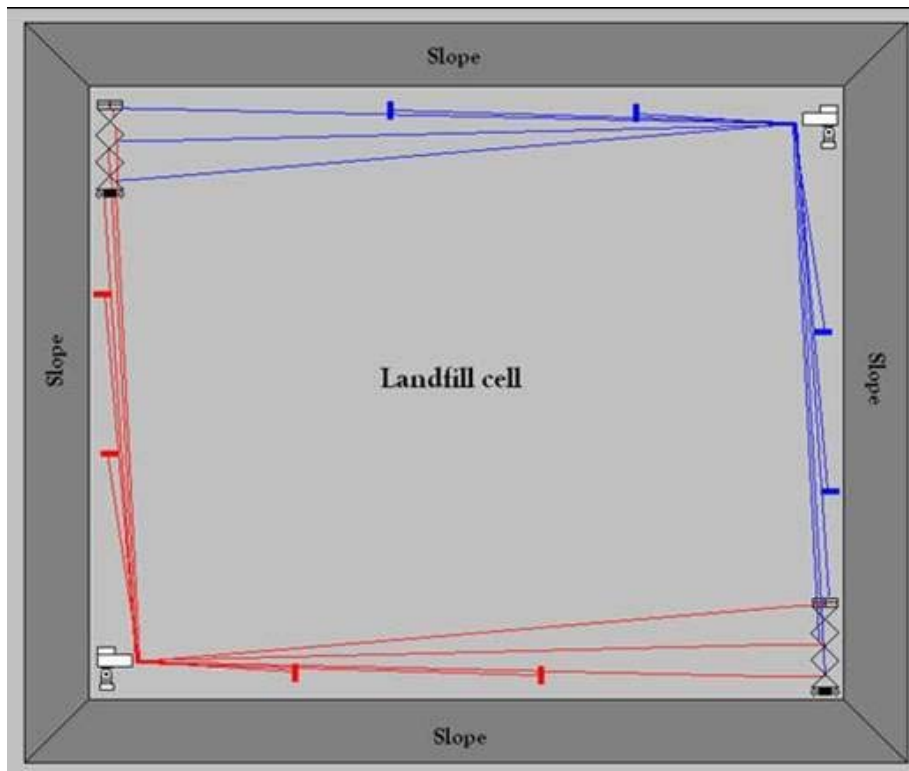
Den metod som ofta används för kvantifiering av metanläckaget för hela avfallsdeponier är spårgas tillsammans med metanmätning. En spårgas, t ex. SF₆ släpps med känt flöde på deponin och plymen från detta utsläpp beräknas sammanfalla med utsläppet av metan från deponin. Både metan och spårgaskoncentrationerna mäts sedan i plymen som bildas i vindriktningen från deponin. För mätning och beräkning av emissionen används

1. Detektering med ljus, differentiell absorbtion (LIDAR/DIAL), kvantitativ metod i kg/hr eller mg/m³
2. AIR detektion och AIRDAR, kvantitativ metod med resultat i E3m³/yr
3. Tunable Diode Laser Absorbtion Spectroscopy (TDLAS), semikvantitativ, resultat i ppm x m
4. FTIR, öppen strålgång Fourier Transform, semikvantitativ, resultat i ppm x m

Firma Afvalzorg har lanserat en modifierad mätningsteknik för flödesmätning från hela deponier, som också använder spårämne och koncentrationsmätning ”nedströms” i vinden.

Man sätter ut (14-15 st) vaccumflaskor för att samla in atmosfärsprover under 4 timmar samtidigt som spårgas släpps ut från en plats på deponin. I övrigt sker beräkning på samma sätt som ovan (Jakobs, 2007).

VRPM, Vertical Radial Plum Mapping är en ny metod som lanseras av US EPA. Denna metod kan mäta flödet från delar av deponier. Ett laserinstrument används som är fastsatt på ett stativ. Laserinstrumentet kan genom förprogrammering riktas mot olika reflektorer som satts upp i hörnen av den yta som skall flödesbestämmas. Principen framgår av figur 1.1.



Figur 1.1: Mätning med laser mot reflektorer för bestämning av utflöde från en deponicell enligt VRPM-metoden.

Laserinstrumentet riktas med särskild automatik i ca 10 sek mot varje reflektor och koncentrationsdata lagras. Strålgången flyttas sedan till bästa reflektor och ny mätning görs. Ett flertal omgångar av mätningar görs.

Alla data bearbetas i särskilt utformat program som konverterar koncentrationer till flödesdata. Tyvärr är detta datorprogram inte tillgängligt kommersiellt, utan databearbetningen görs genom University of Washington, USA (Amish Adam, 2008).

Enligt Boreal, det företag som lanserar utrustningen kommer metoden att kunna utvecklas till en fältoperativ metod i framtiden. I dagsläget är metoden för krånglig och utvecklingsarbete återstår.

Kammarmetoden är en metod som länge använts för att beräkna flöde från deponiytor under lång tid. Dess användningssätt framgår av detta projekt.

BILAGA 6

FÄLT OBSERVATIONER, LASERINSTRUMENTET

Data använda i kapitel 12

Tabellen 12.1 visar variationer i ppm-data för västra slänten, SYSAV, Spillepeng, Biocell 8 (BC8). I samtliga 22 mätobjekt emitteras metangas genom små, för ögat knappt visuella synliga sprickbildningar, figur 12.15. Fältnätning med Siemens lasersystem, utförd 2006.

	Deponi 2006	Datum- Filnamn	ID- objekt	Laser Ppm	GPS
6	SYSAV	Sysav_SBC8_1-3_061011_01	Biocell 8 (BC8)	1=300 2=50-100 3≤400	x
7	SYSAV	Sysav_SBC8_4_061011	Biocell 8	4≤600	x
8	SYSAV	Sysav_SBC8_5_061011	Biocell 8	5=400	x
9	SYSAV	Sysav_SBC8_6-10_061011	Biocell 8	6≤2000 7≤1100 8≤4500 9≤3000 10≤2000	x
10	SYSAV	Sysav_SBC8_11-22_061011	Biocell 8	11≤4000 12≤2000 13≤1000 14≤500 15≤1000 16≤1000 17≤450 18≤3400 19≤150 20≤2500 21≤2000 22≤100-500	x

Tabell 12.2: Variationen i ppm-data för Löt vid momentan fältmätning med Siemens lasersystem, utförd 2006.

	Deponi 2006	Datum- filnamn	ID- objekt	Laser ppm 2006	Laser ppm 2007	Datum- filnamn
1	Löt	Löt_L1_1-8_060914_01	Slänt+ släntkrön + släntfot	1≤1400 2≤50 3≤300 4≤100 5=500-700 6≤500 7=400-500 8≤300	1=1800 2≤35 3≥6000 4≤20 5≤500 6=2000 7≤25 8≤20	Löt_L1_1-8_070719_01
2	Löt	Löt_L2_1-5_060914_01	Nedersta Släntkrön	1=250 2≤400 3=6000 4≤5000 5≤1000	1≤20 2≤300 3≤200 4≥3500 5≤3700 4-01≤4000=nytt objekt vid k-mätning.	Löt_L2_1-5_070719_01
3	Löt	Löt_L3_1-3_060914_01	Släntkrön	1≤4000 2≤1200 3≤1500	1≤20 2≤20 3≤225 4≥500=nytt objekt	Löt_L3_1-4_070719_01
4	Löt	Löt_L4_1-5_060914_01	3:e slänt- krön	1=1000-1400 2=uppgift saknas 3=uppgift saknas 4=uppgift saknas 5=uppgift saknas	1≤ 500 2=uppgift saknas 3=uppgift saknas 4≤500 5=50-1700	Löt_L4_1-5_070719_01
5	Löt	Löt_L5_1-5_060914_01	Släntkrön	1≤1500 2≤2000 3=800 4=1000 5=uppgift saknas	1=7000 2=0 3=1500	Löt_L5_1-5_200703_05

Tabell 12.3: Tabell med jämförande ppm-data för samma objekt/ytor från två olika mät-
tillfällen, 2006 respektive 2007. Fältmätning utförd med Siemens lasersystem.

	Deponi 2006	Datum- filnamn	ID- objekt	Laser ppm 2006	Laser ppm 2007-	Datum- Filnamn
1	Forsbacka	Forsbacka-F1- 01-07-060919	S:slänten- släntfot- släntkrön	1≥4000 2≥4000 3≤500 4≥400 5≥2500 6≥500 7≥3000	1=500-7000 2≤500 3≤1400 4≤250 5=1500-2000 6=10-30 7=1500-2000	Forsbacka_F1- 1-7_070712
2	Forsbacka	Forsbacka-F1- 8-15_060919	S:slänten- släntfot- släntkrön	8≥5000 9≥3000 10≥700 11≥6000 12≥6000 13≥12000 14=6-7000 15≥3000	8≤1100 9≤700 10≤7000 11=15 12=15 13=30 14≤6000 15≤3800	Forsbacka_F1- 9-15_070712

Tabell 12.4: Tabell med jämförande ppm-data för samma objekt/ytor från två olika mät-
tillfällen vid släntkrönet, F3-området, Forsbacka deponin, 2006 respektive 2007. Fältmätning med
Siemens lasersystem.

	Deponi 2006- 2007	Datum- Filnamn	ID- objekt	Laser ppm 2006	Laser ppm 2007	Datum- filnamn
1	Forsbacka	Forsbacka_F3- 01-08_060919_01	Norra slänten	1=11-12000 2≥2000 3≥7000 4≥4000 5≥6000 6≥1500 7≥1700 8≥1000	1≥5000 2≤1200 3≤2200 4≤500 5=2100 6≤1500 7≥1000 8=1000-3000	Forsbacka_F3_01- 08_070712
2	Forsbacka	Forsbacka_F3- 9-12_060919	Norra slänten	9≥5000 10≥4000 11≥1500 12=4-6000	9≥1700 10=4300 11≥4000 12=3800	Forsbacka_F3_09- 12_070712
3	Forsbacka	Forsbacka_F3_01- 070712_01	Norra slänten (rör)	1≥4000 (kort rör) 2≥4000 (barlagd yta + rör 1) 3≥5000(kort rör) 4≥5- 10000(långt rör)	1=6000(korta1) 2=4000 (barlagd yta+ rör) 3=7- 9000(korta2) 4=20000 (långa röret)	Forsbacka_F3_09- 15_070712

Tabell 12.5: Jämförande ppm-data för samma läckageobjekt/yltor, registrerade vid två olika fältmättillfällen, släntfot Löt L2 1-5, 2006 respektive 2007, västra slänten.

Deponi 2006-2007	Datum- Filnamn	ID- objekt	Laser ppm 2006	Laser ppm 2007	Datum- Filnamn
Löt	Löt_L2_1-5_060914_01	Nedersta släntkrön	1=250 2≤400 3=6000 4≤5000 5≤1000	1≤20 2≤300 3≤200 4≥3500 5≤3700 4-01≤4000=nytt objekt vid k-mätning.	Löt_L2_1-5_070719_01

Tabell 12.6: Sammanställning av hittills utförda fältmätningar vid Högdala deponin, 2007-07-06 - 2007-11-28.

	Deponi 2007	Datum- filnamn	ID- objekt	Laser ppm	mb	m/s	Ts	TI	Fältnätmetod
1	Högdala	Högdala_slänt V-N-Ö-S-SW- Platå_070706_01	Platå + slänter- gasfackla ur funktion	V=100-400 N=100-400 Ö=50-100 S=100-400 SW=1500-2000 Platå≤1000					Fältnätmetod
2	Högdala	Högdala_slän V-N-Ö-S-Pla- tå_070720_01	Platå + slänter- gasfackla i funktion	V=50-100 N=50-100 Ö=50-100 S=50-200 SW=50 Platå=50-100					Fältnätmetod
3	Högdala	Högdala_fält- observ_071115_01	Platå + slänter- facklan på	S=100-400 V=150-300	1016	1-4	-50		Fältnätmetod
4	Högdala	Högdala_071127	Platå + slänter- facklan på	Generellt=100-200 Byig vind!	1004	6-12	-50	-3,3	Fältnätmetod avbruten pga byig vind
5	Högdala	Högdala_071128	Facklan avstängd	Loggermätning 14 ⁴⁵ -16 ^{15*} Bra resultat=se exempel på diagram.	1003= fallan- de! Se logger mätn.			+1	Loggermätn- 16 ¹⁵ ymnigt snöfall- Ny logger- nätning pla- neras med facklan på.

BILAGA 7

Kammarmetodmätningar, resultat

Deponi	Provpunkt inom testyta	Laserinstrument koncentration ppm	Kammarmetod Emission Liter/år, m2	Kommentar
1				
Spillepeng, testceller, 2007-05-31				
10 x 10 m				
Spillepeng	B4	0	0	
Spillepeng	B5	0	0	
Spillepeng	C2	0	0	
Spillepeng	C3	0	0	
Spillepeng	E1	3333	148183	Spricka med konvektiv strömning?
Spillepeng	E4	0	3311	Perfekt kurva
2				
Spillepeng, äldre del, 2005-05-31				
10 x 10 m				
Spillepeng	A5	0	0	
Spillepeng	B5	0	0	
Spillepeng	C4	0	0	
Spillepeng	D1	0	0	
Spillepeng	E2	0	0	
Spillepeng	E5	0	0	
3				
Filborna, östra slänten, 2007-06-01				
24 x 4 m				
Filborna	B1	25	0	Krossad flaska
Filborna	E2	25	0	
Filborna	G2	25	0	
Filborna	H1	25	0	
Filborna	I1	25	3518	
Filborna	K1	25	0	Krossad flaska
4				
Filborna, sluttäckt yta, 2007-06-01				
10 x 10 m				
Filborna	A2	1,7	112	Inom felmarginal
Filborna	B1	1,7	114	Inom felmarginal
Filborna	B2	1,7	109	Inom felmarginal
Filborna	B3	1,7	0	
Filborna	B4	1,7	27	Mycket lågt värde, kan skattas till noll.
Filborna	E2	1,7	424	
5				
Filborna, sandlåda, 2007-06-01				
1 x 2 m				
Kontrollerat flö FK1		125	147825	
Kontrollerat flö FK2		90	95397	
Kontrollerat flö FK3		491	333344	
Kontrollerat flö FK4		95	164308	
6				
Löt överyta, 2007-06-12				
10 x 10 m				
Löt	B1	1333	663	
Löt	B2	83	0	
Löt	D1	500	11500	
Löt	D3	1833	259739	Spricka med konvektiv strömning?
Löt	E3	1167	38639	
Löt	E5	0	0	

Deponi	Provpunkt inom testyta	Laserinstrument koncentration ppm	Kammarmetod Emission Liter/år, m2	Kommentar
7				
Löt, slänt, 2007-06-12				
24 x 4 m				
Löt	C1	0	0	
Löt	D2	333	115653	
Löt	G1	0	0	Mycket lågt värde, kan skattas till noll.
Löt	H2	0	0	
Löt	I2	1333	73915	
Löt	K1	542	15710	
Löt	EX	6667	1379999	Vet statoil om detta?
8				
Hagby E 89, 2007-06-11				
24 x 4 m				
				Ser ut som metanoxidation i de
Hagby	D2	0	0	flesta provpunkterna på limpan
Hagby	H1	50	0	
Hagby	I2	50	0	
Hagby	J1	50	2637	
Hagby	K1	75	0	
Hagby	K2	333	0	
9				
Hagby E 90, 2007-06-11				
10 x 10 m				
Hagby	A4	25	0	
Hagby	B4	25	23	Mycket lågt värde, kan skattas till noll.
Hagby	C2	25	0	
Hagby	C3	25	119	Mycket lågt värde, kan skattas till noll.
Hagby	D2	25	0	
Hagby	D5	25	15	Mycket lågt värde, kan skattas till noll. Extremt skakig kurva varierar
Hagby	EX	25	0	oregelbundet på en hög nivå
10				
Forsbacka, slänt i norr, 2007-06-13				
24 x 4 m				
Forsbacka	C1	25	2	Dvs noll
Forsbacka	C2	25	391	
Forsbacka	F2	25	0	
Forsbacka	H2	417	2580	Extremt linjärt
Forsbacka	J1	25	0	
Forsbacka	K2	25	0	
11				
Forsbacka, överyta, 2007-06-13				
10 x 10 m				
Forsbacka	A1	25	0	
Forsbacka	A3	417	10773	
Forsbacka	B4	25	26	Dvs noll
Forsbacka	D2	25	36	Dvs noll
Forsbacka	D3	1250	84500	
Forsbacka	E4	25	0	Dvs noll
12				
F2 överyta, 2007-09-25				
24x24 m				
F2	A2	42	0	Dvs noll, dålig korrelation
F2	B1	833	74866	Extremt god korrelation
	C1	58	0	Dvs noll
	E1	3333	257460	Extremt god korrelation
	I1	42	0	Dvs noll
	J1	25	10	Dvs noll

Deponi	Provpunkt inom testyta	Laserinstrument koncentration ppm	Kammarmetod Emission Liter/år, m2	Kommentar
13	slänt, 2007-09-25			
F2 18x6 m				
F2	B1	500	34156	Extremt god korrelation
	B3	25	160	Dvs noll. Extremt bra korrelation
	D1	25	0	Dålig korrelation
	D2	1167	341658	
	E2	833	242881	Extremt bra korrelation
	F1	25	0	Dvs noll
14	släntkrön, 2007-09-25			
F2 Linje 6 punkter F2	1	1667	467255	Extremt god korrelation 4 kubikmeter per dygn!/ 175 liter i timmen! Extremt bra
	2	2000	1537401	korrelation
	3	3333	291330	Extremt god korrelation
	4	1667	331517	Extremt god korrelation
	5	1167	200414	Extremt god korrelation
	6		344040	Extremt god korrelation
15	överyta, västra hörnet, 2007-09-27			
F1 10x10 m				
F1	A4	250	54981	Extremt god korrelation
	A5	83	245245	Extremt god korrelation
	B4	33	2457	
	B5	1667	51819	
	C4	17	233	Dvs noll
	C5	1667	11088	Extremt god korrelation
16	slänt i norr, 2007-09-27			
F1 24x4 m				
F1	B1	500	43892	
	C2	2500	2467	
	D1	5000	959862	
	F1	2500	25083	Dålig korrelation
	G2	3000	71760	Dålig korrelation
	K2	1000	169779	Extremt god korrelation
17	släntkrön vid väg, 2007-09-27			
F1 50x2 m				
F1		25	25632	Extremt god korrelation
		25	3652	
		25	8060	Extremt god korrelation
		25	214345	Extremt god korrelation
		25	72	Dvs noll
		417	18099	Extremt god korrelation
18	kalt område, 2007-09-27			
F1 10x10 m				
F1	A1	833	259466	Extremt god korrelation
	C1	333	42907	Extremt god korrelation
	D2	833	352925	
	D5	133	182395	Extremt god korrelation
	E1	25	26514	Extremt god korrelation
	E3	58	110318	Extremt god korrelation

Deponi	Provpunkt inom testyta	Laserinstrument koncentration ppm	Kammarmetod Emission Liter/år, m2	Kommentar
19				
Filborna, georesistivitet, 2007-12-04, kl 1222				
10 x 10 m				
Filborna v 49	A	58	239159	Extremt god korrelation
Filborna v 49	B	25	3787	Extremt god korrelation
Filborna v 49	C	42	156190	Extremt god korrelation
Filborna v 49	D	38	23742	Extremt god korrelation
Filborna v 49	E	50	35221	Extremt god korrelation
Filborna v 49	F	25	645707	Extremt god korrelation
20				
Filborna, georesistivitet, 2007-12-04, kl 1620				
10 x 10 m				
Filborna v 49	A	542	289956	Extremt god korrelation
Filborna v 49	B	58	38392	Extremt god korrelation
Filborna v 49	C	208	105683	Extremt god korrelation
Filborna v 49	D	25	8324	Extremt god korrelation
Filborna v 49	E	142	49890	Extremt god korrelation
Filborna v 49	F	292	328496	Extremt god korrelation
21				
Filborna, georesistivitet, 2007-12-05				
10 x 10 m				
Filborna v 49	A	58	89047	Extremt god korrelation
Filborna v 49	B	208	27737	Extremt god korrelation
Filborna v 49	C		178597	Extremt god korrelation
Filborna v 49	D	63	60223	Extremt god korrelation
Filborna v 49	E	267	36452	Extremt god korrelation
Filborna v 49	F	500	408767	Extremt god korrelation
22				
Filborna, georesistivitet, 2007-12-05, kl 1450				
10 x 10 m				
Filborna v 49	A	133	66490	Extremt god korrelation
Filborna v 49	B	1267	77765	Extremt god korrelation
Filborna v 49	C	54	159988	Extremt god korrelation
Filborna v 49	D	54	34743	Extremt god korrelation
Filborna v 49	E	71	175105	God korrelation
Filborna v 49	F	238	422706	Extremt god korrelation
23				
Filborna, georesistivitet, 2007-12-12, kl 1424				
10 x 10 m				
Filborna v 49	A	5000	556720	Extremt god korrelation
Filborna v 49	B	2083	576011	God korrelation
Filborna v 49	C	667	223461	Extremt god korrelation
Filborna v 49	D	75	285	Extremt god korrelation
Filborna v 49	E	433	140680	Extremt god korrelation
Filborna v 49	F	2083	376245	Extremt god korrelation

BILAGA 8

Georesistivitmätningar, starttider för mätningarna
vid samtliga linjer

	Mätning						
	1	2	3	4	5	6	7
Linje	2007-12-03	2007-12-04		2007-12-05		2007-12-12	
A	10:33:51	07:44:43	13:39:26	08:00:22	13:42:12	08:11:13	12:47:06
B	10:56:43	08:07:13	13:58:08	08:24:00	14:25:26	08:28:57	14:07:40
C	11:19:08	08:40:32	14:17:41	08:51:21	14:45:05	09:19:28	14:29:23
D	11:41:24	09:16:13	14:36:51	09:40:33	15:03:10	09:55:24	14:49:50
E	12:06:06	10:08:43	14:54:51	10:02:31	15:21:43	10:19:38	15:07:55
F	13:55:59	10:46:52	15:14:46	10:23:03	15:41:15	10:41:16	15:26:17
G	14:16:03	11:09:15	15:46:23	10:53:13	15:58:21	11:03:43	15:43:49
H	14:37:08	11:32:46	16:09:24	12:11:44	16:17:16	11:22:37	16:01:03
I	14:58:45	12:05:57	16:36:29	12:29:44	16:38:21	11:41:24	16:17:50
J	15:19:25	12:26:04	17:01:01	12:48:06	16:55:58	12:08:02	16:36:14
K	15:44:17	12:44:11	17:29:32	13:06:24	17:26:26	12:25:25	16:54:21
IB	14:58:45	-	-	-	-	-	-
IC	16:16:12	-	-	-	-	-	-

BILAGA 9

Geoelektricitetsmätningar, koordinater för alla elektroder

Elektrod	Z	X	Y
A1	75.115	14221.554	12954.239
A2	75.002	14222.027	12954.315
A3	74.896	14222.487	12954.403
A4	74.790	14222.964	12954.502
A5	74.667	14223.447	12954.621
A6	74.504	14223.949	12954.677
A7	74.319	14224.415	12954.774
A8	74.157	14224.841	12954.858
A9	73.987	14225.329	12954.929
A10	73.816	14225.757	12955.065
A11	73.689	14226.258	12955.099
A12	73.502	14226.683	12955.190
A13	73.335	14227.184	12955.282
A14	73.184	14227.607	12955.339
A15	72.930	14228.091	12955.452
A16	72.591	14228.498	12955.572
A17	72.437	14228.967	12955.631
A18	72.375	14229.428	12955.671
A19	72.336	14229.954	12955.774
A20	72.377	14230.422	12955.846
A21	72.485	14230.912	12956.018

Elektrod	Z	X	Y
B1	75.150	14221.552	12955.179
B2	75.007	14221.935	12955.250
B3	74.899	14222.340	12955.312
B4	74.738	14222.829	12955.453
B5	74.603	14223.309	12955.564
B6	74.427	14223.783	12955.602
B7	74.278	14224.223	12955.651
B8	74.086	14224.731	12955.828
B9	73.945	14225.127	12955.926
B10	73.740	14225.571	12956.028
B11	73.547	14226.018	12956.169
B12	73.391	14226.493	12956.203
B13	73.175	14227.004	12956.302
B14	73.055	14227.377	12956.382
B15	72.848	14227.841	12956.486
B16	72.646	14228.356	12956.588
B17	72.554	14228.855	12956.642
B18	72.480	14229.261	12956.658
B19	72.399	14229.717	12956.769
B20	72.519	14230.294	12956.884
B21	72.503	14230.848	12956.954

Elektrod	Z	X	Y
C1	75.243	14221.336	12956.160
C2	75.097	14221.832	12956.242
C3	74.907	14222.244	12956.281
C4	74.781	14222.666	12956.391
C5	74.564	14223.201	12956.477
C6	74.418	14223.569	12956.571
C7	74.238	14224.065	12956.693
C8	74.103	14224.511	12956.753
C9	73.887	14224.965	12956.947
C10	73.664	14225.437	12957.000
C11	73.450	14225.878	12957.144
C12	73.284	14226.275	12957.167
C13	73.059	14226.845	12957.312
C14	72.963	14227.227	12957.325
C15	72.808	14227.707	12957.448
C16	72.638	14228.239	12957.509
C17	72.566	14228.663	12957.594
C18	72.504	14229.094	12957.649
C19	72.473	14229.528	12957.740
C20	72.473	14230.101	12957.950
C21	72.439	14230.665	12957.922

Elektrod	Z	X	Y
D1	75.182	14221.176	12957.110
D2	75.054	14221.628	12957.218
D3	74.878	14222.113	12957.261
D4	74.758	14222.540	12957.355
D5	74.614	14222.988	12957.505
D6	74.426	14223.479	12957.526
D7	74.265	14223.954	12957.708
D8	74.090	14224.367	12957.770
D9	73.884	14224.801	12957.919
D10	73.661	14225.263	12957.986
D11	73.418	14225.717	12958.079
D12	73.190	14226.148	12958.168
D13	73.016	14226.659	12958.268
D14	72.982	14227.049	12958.307
D15	72.752	14227.576	12958.481
D16	72.621	14228.074	12958.500
D17	72.505	14228.481	12958.564
D18	72.438	14228.900	12958.633
D19	72.438	14229.334	12958.698
D20	72.524	14229.981	12958.916
D21	72.491	14230.505	12958.886

Elektrod	Z	X	Y
E1	74.961	14221.023	12958.197
E2	74.966	14221.475	12958.190
E3	74.893	14221.973	12958.236
E4	74.748	14222.373	12958.422
E5	74.664	14222.873	12958.515
E6	74.537	14223.338	12958.591
E7	74.354	14223.733	12958.735
E8	74.130	14224.242	12958.755
E9	73.884	14224.690	12958.855
E10	73.682	14225.125	12958.973
E11	73.445	14225.547	12959.091
E12	73.250	14226.009	12959.143
E13	72.993	14226.543	12959.286
E14	72.868	14226.909	12959.337
E15	72.713	14227.398	12959.455
E16	72.522	14227.921	12959.512
E17	72.413	14228.368	12959.608
E18	72.361	14228.717	12959.692
E19	72.480	14229.226	12959.735
E20	72.530	14229.803	12959.876
E21	72.572	14230.357	12959.868

Elektrod	Z	X	Y
F1	74.802	14220.819	12959.043
F2	74.813	14221.333	12959.194
F3	74.839	14221.817	12959.307
F4	74.772	14222.196	12959.329
F5	74.695	14222.710	12959.420
F6	74.557	14223.156	12959.511
F7	74.420	14223.610	12959.637
F8	74.177	14224.077	12959.720
F9	73.971	14224.538	12959.847
F10	73.701	14224.997	12959.896
F11	73.392	14225.446	12960.082
F12	73.174	14225.831	12960.139
F13	72.988	14226.343	12960.218
F14	72.840	14226.754	12960.241
F15	72.662	14227.217	12960.444
F16	72.507	14227.766	12960.475
F17	72.427	14228.203	12960.565
F18	72.408	14228.595	12960.628
F19	72.513	14229.071	12960.687
F20	72.509	14229.661	12960.769
F21	72.516	14230.163	12960.841

Elektrod	Z	X	Y
G1	74.850	14220.690	12960.037
G2	74.763	14221.169	12960.221
G3	74.799	14221.624	12960.225
G4	74.810	14222.044	12960.373
G5	74.738	14222.506	12960.503
G6	74.585	14223.025	12960.595
G7	74.471	14223.449	12960.694
G8	74.219	14223.871	12960.758
G9	73.949	14224.336	12960.858
G10	73.726	14224.812	12961.029
G11	73.413	14225.290	12961.069
G12	73.220	14225.673	12961.116
G13	73.022	14226.137	12961.244
G14	72.891	14226.585	12961.216
G15	72.718	14227.097	12961.403
G16	72.546	14227.567	12961.433
G17	72.447	14228.061	12961.529
G18	72.462	14228.459	12961.613
G19	72.513	14228.946	12961.729
G20	72.475	14229.486	12961.676
G21	72.463	14229.966	12961.737

Elektrod	Z	X	Y
H1	74.797	14220.501	12961.007
H2	74.829	14220.968	12961.151
H3	74.813	14221.498	12961.229
H4	74.795	14221.841	12961.338
H5	74.697	14222.343	12961.395
H6	74.576	14222.898	12961.477
H7	74.401	14223.312	12961.601
H8	74.161	14223.759	12961.710
H9	73.881	14224.190	12961.827
H10	73.575	14224.679	12961.908
H11	73.400	14225.187	12962.029
H12	73.187	14225.530	12962.091
H13	72.944	14226.027	12962.212
H14	72.855	14226.420	12962.169
H15	72.686	14226.899	12962.372
H16	72.557	14227.411	12962.401
H17	72.501	14227.874	12962.500
H18	72.503	14228.258	12962.616
H19	72.550	14228.824	12962.650
H20	72.543	14229.320	12962.812
H21	72.530	14229.810	12962.806

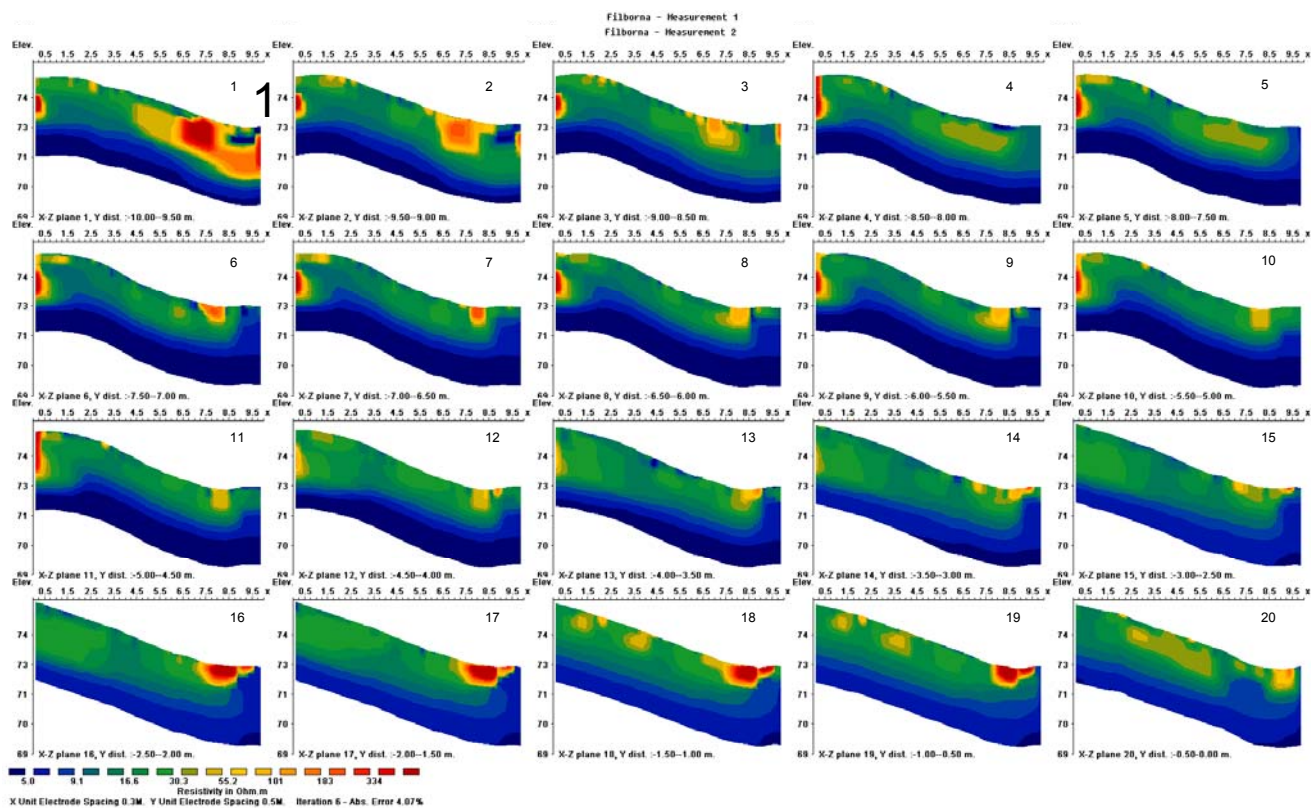
Elektrod	Z	X	Y
I1	74.694	14220.312	12962.001
I2	74.780	14220.816	12962.071
I3	74.770	14221.303	12962.173
I4	74.729	14221.683	12962.271
I5	74.656	14222.172	12962.371
I6	74.529	14222.636	12962.455
I7	74.333	14223.121	12962.580
I8	74.095	14223.570	12962.703
I9	73.808	14224.092	12962.790
I10	73.558	14224.543	12962.885
I11	73.392	14224.939	12963.052
I12	73.192	14225.379	12963.065
I13	73.044	14225.864	12963.174
I14	73.012	14226.327	12963.261
I15	72.938	14226.783	12963.383
I16	72.781	14227.281	12963.354
I17	72.643	14227.716	12963.489
I18	72.577	14228.150	12963.614
I19	72.596	14228.664	12963.739
I20	72.621	14229.139	12963.804
I21	72.575	14229.680	12963.822

Elektrod	Z	X	Y
J1	74.689	14220.151	12963.024
J2	74.750	14220.581	12963.084
J3	74.839	14221.135	12963.168
J4	74.820	14221.498	12963.319
J5	74.749	14221.964	12963.331
J6	74.601	14222.512	12963.493
J7	74.398	14222.945	12963.560
J8	74.200	14223.385	12963.598
J9	73.984	14223.819	12963.797
J10	73.792	14224.317	12963.825
J11	73.652	14224.743	12963.976
J12	73.391	14225.234	12964.026
J13	73.196	14225.713	12964.138
J14	73.024	14226.225	12964.171
J15	72.922	14226.660	12964.303
J16	72.889	14227.109	12964.391
J17	72.817	14227.573	12964.441
J18	72.712	14228.024	12964.626
J19	72.672	14228.545	12964.703
J20	72.743	14229.010	12964.823
J21	72.758	14229.539	12964.824

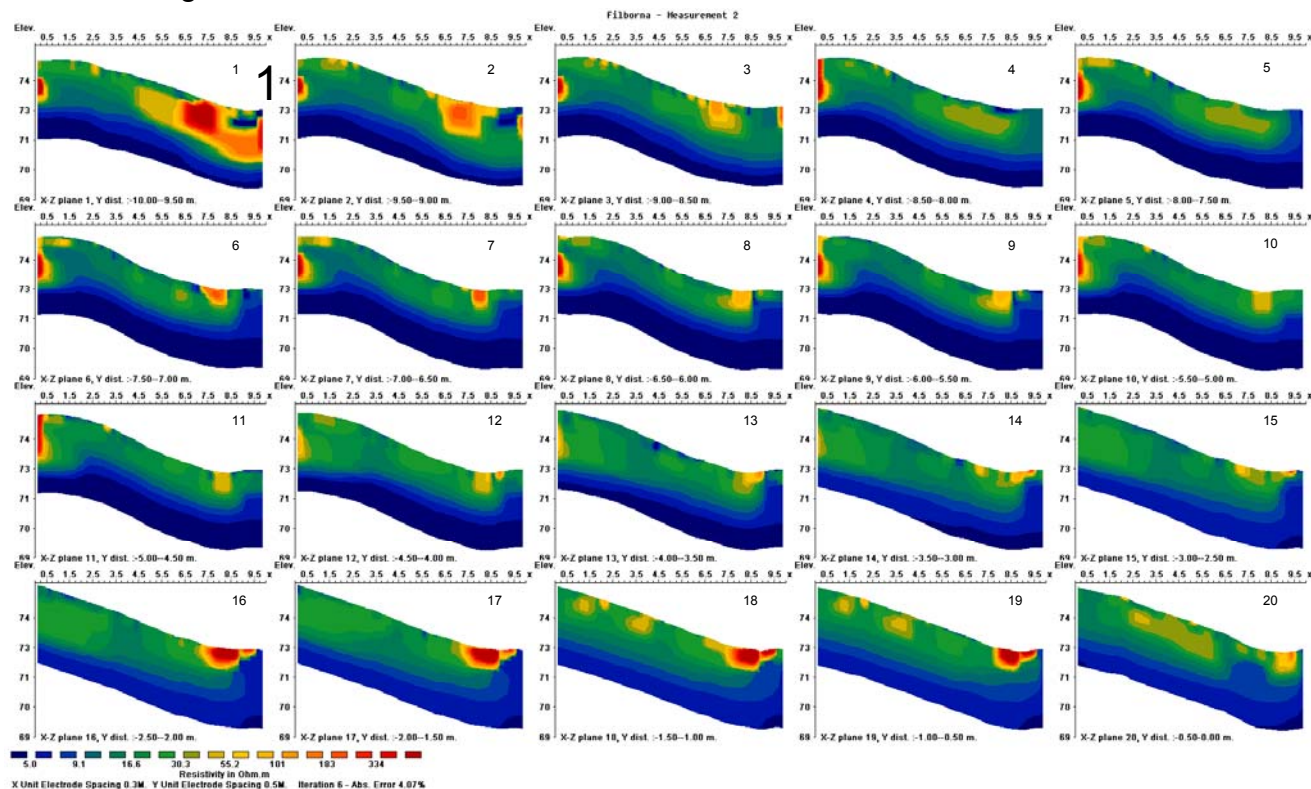
Elektrod	Z	X	Y
K1	74.629	14219.928	12963.882
K2	74.620	14220.395	12964.033
K3	74.650	14220.900	12964.177
K4	74.613	14221.424	12964.244
K5	74.599	14221.914	12964.405
K6	74.496	14222.377	12964.426
K7	74.243	14222.838	12964.557
K8	74.205	14223.254	12964.640
K9	74.166	14223.758	12964.727
K10	74.003	14224.307	12964.842
K11	73.876	14224.724	12964.942
K12	73.765	14225.173	12965.010
K13	73.597	14225.683	12965.133
K14	73.443	14226.085	12965.161
K15	73.179	14226.555	12965.228
K16	72.992	14226.998	12965.342
K17	72.812	14227.504	12965.448
K18	72.654	14227.970	12965.614
K19	72.553	14228.413	12965.684
K20	72.526	14228.819	12965.779
K21	72.553	14229.372	12965.857

BILAGA 10

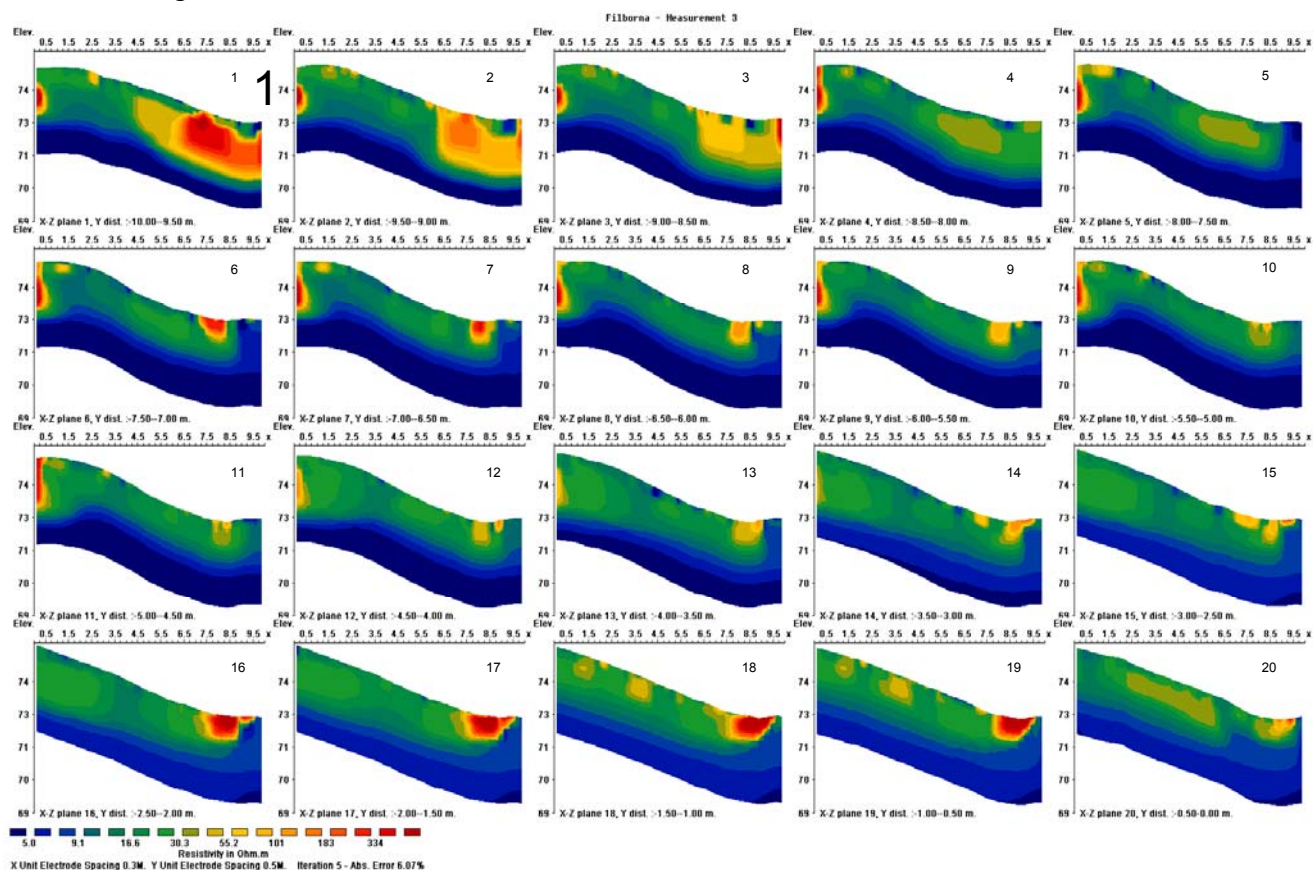
Geoelektricitetsmätningar, Tidssteg 1



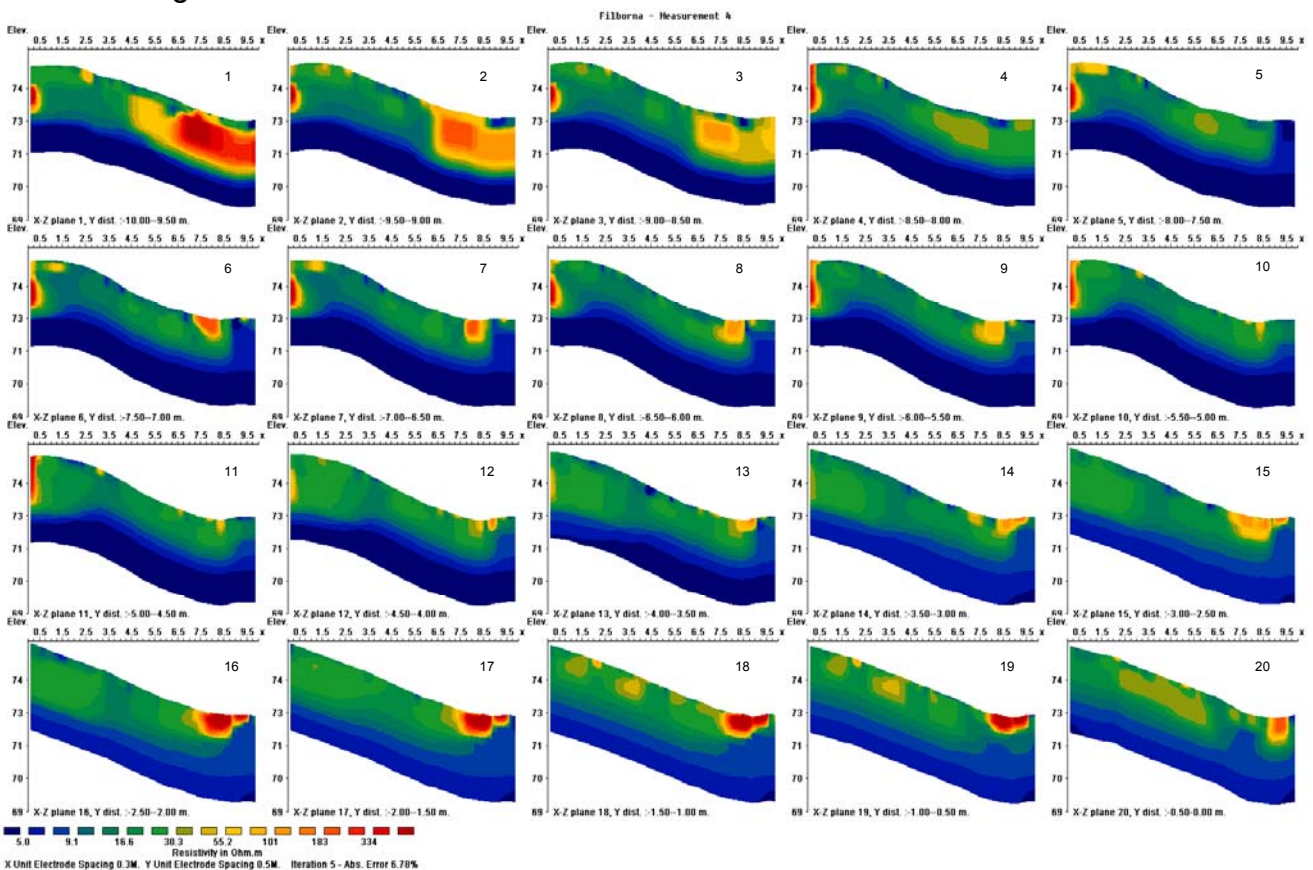
Tidssteg 2



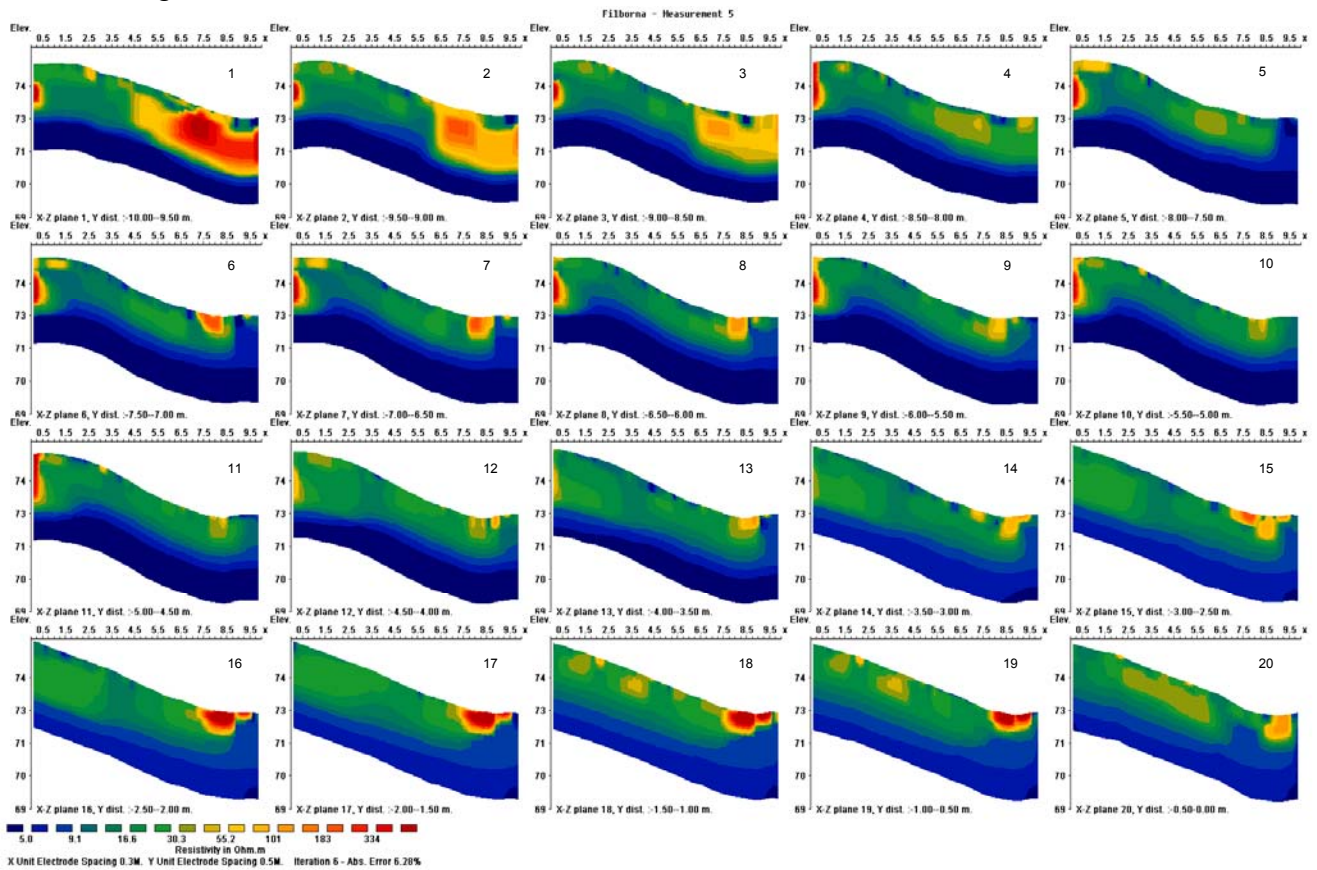
Tidssteg 3



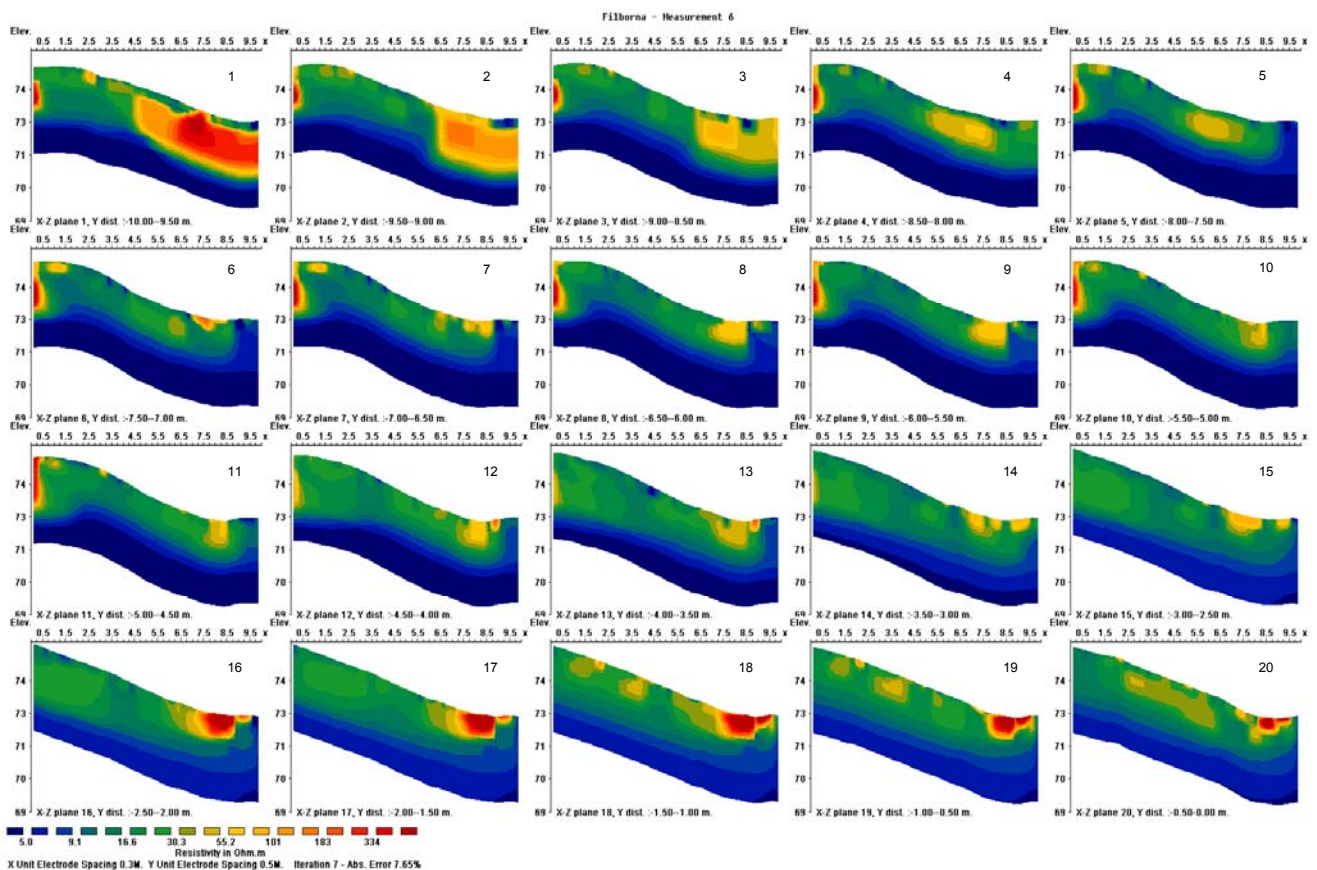
Tidssteg 4



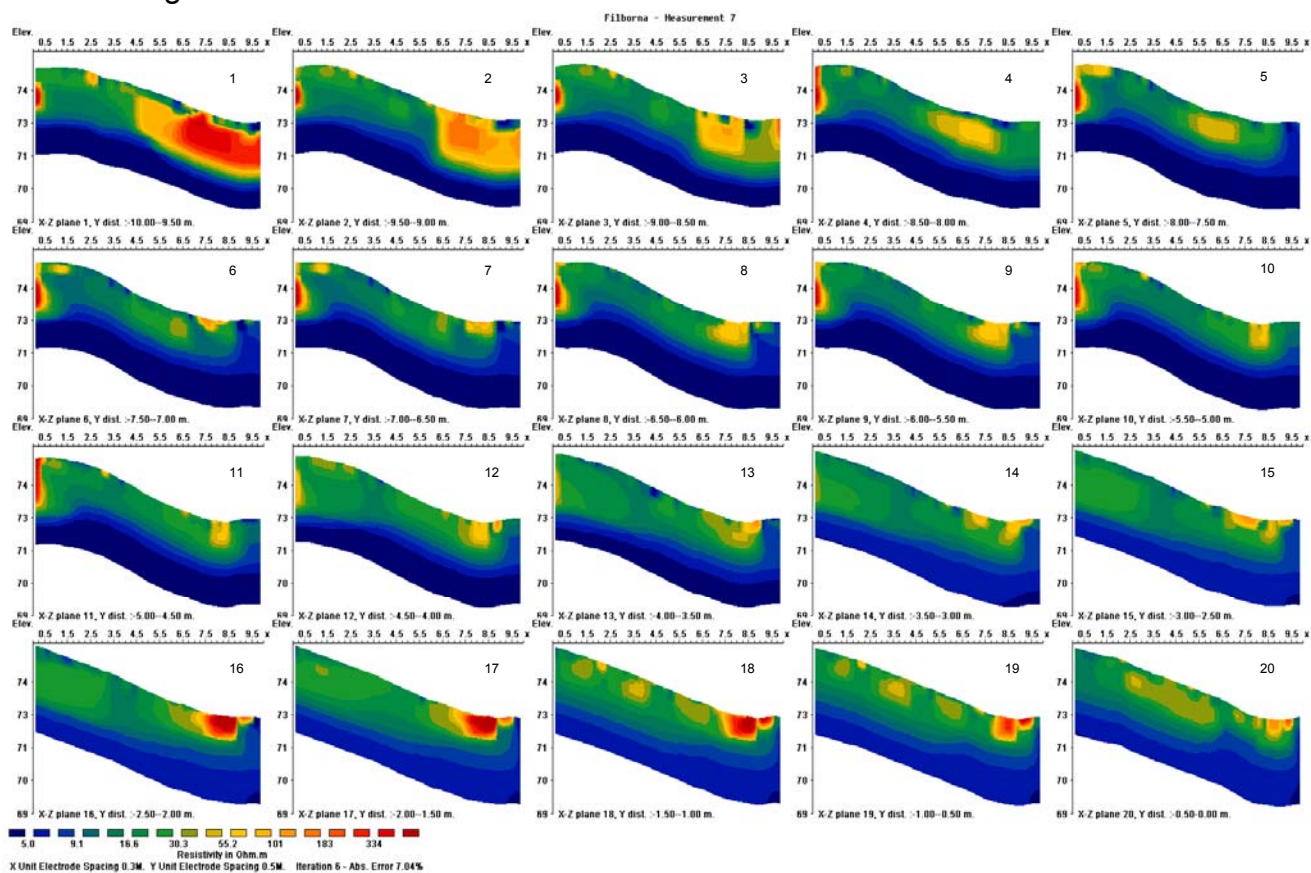
Tidssteg 5



Tidssteg 6



Tidssteg 7



Fjärranalys för statusbestämning av avfallsupplag energi och miljötillämpningar

Ett forskningsprojekt med syfte att utveckla teknik och metoder för statusbestämning av avfallsupplag, emissioner av metangas, energi och miljörelaterade tillstånd, presenteras. Projektet är en fortsättning på ett nyligen avslutat EU-projekt (the VOGUE-project, NNES-1999-20031). Syftet med VOGUE-projektet var att utveckla lasersystem för detektering av metangas, och att studera hur metangas beter sig under verklighetstroga förhållanden.

En slutrapport från VOGUE-projektet levererades till och godkändes av EU kommissionen, augusti 2004. De olika delstudierna i VOGUE-projektet syftade till att utveckla tekniska system (fjärranalys) och metoder för att på avstånd detektera och visualisera läckage av metangas från ledningssystem förlagda under och ovan mark. VOGUE-projektet var ett forsknings- och utvecklingsprojekt utfört av en internationell arbetsgrupp av forskare, tekniker och slutanvändare. Slutanvändarna representerade företag som producerar och distribuerar metangas.

Slutprodukten från VOGUE-projektet var sex lasersystem (prototyper) för detektering av metangas. Prototyperna har testats under kontrollerbara förhållanden vid ett för ändamålet konstruerat fältlaboratorium vid Malmö Brandkärs gasövningsfält, BARBARA, Spillepeng, och vid fältlaboratorier hos ADVANTICA (f.d. British Gas). Slutanvändarna har utfört jämförande test av prototyperna med traditionell teknologi för detektering av metangas, s.k. sniffers. Testen utfördes under verkliga fältförhållanden för ett urval distributionsnät i Europa. Syftet med testen var att fastställa lasersystemens träffsäkerhet, operativa användbarhet och begränsningar för detektering av läckage av metangas från ledningsnät ovan och under mark.

Lasersystemen utvecklade inom VOGUE-projektet (active gas detection) mäter koncentrationen metangas i ppm.m. Data från mätningen med lasersystemen presenteras som en koncentrationsprofil på bildskärm i fält och kan lagras på en bärbar PC för senare presentation och analys. Metangas kan inte visualiseras med de aktuella lasersystemen. Inom VOGUE-projektet användes därför högupplösande IR-system (passive gas imaging) för att detektera och visualisera kontrollerade gasläckage simulerade från gasledning. Syftet var att med hjälp av bildgenererande IR-teknik studera och få ökad kunskap om hur metangas beter sig under olika flöden, tryck, olika storlek på läckage från gasledning, olika fyllnadsmaterial, väder- och utstrålningsförhållanden.

Resultat från VOGUE-projektet indikerar att de lasersystem som utvecklats inom projektet förutom att de kan användas för kartläggning av läckage av metangas från ledning under och ovan mark även kan användas för miljötillämpningar som t.ex. kartläggning av läckage av biogas och statusbestämning av avfallsupplag.

Preliminära test med VOGUE-laser system och bildgenererande IR-system för kartläggning av biogas läckage har utförts vid Filborna avfallsupplag, NSR, Helsingborg, september 2004. Filborna avfallsupplag är en av de första upplag i Sverige med en anläggning för aktivt

omhändertagande av biogas för energiproduktion. För att maximera uttaget av biogas från upplaget, och för att minimera emissionen av metangas till atmosfären har upplaget täckts med olika lager med varierande täckningsmaterial med låg genomtränglighet.

Resultat från de preliminära testen indikerar förekomst av låg koncentration av metangas (10-20 ppm.m) för sektioner med ett tjockt lager täckningsmaterial med låg genomtränglighet, högre koncentration av metangas för sektioner med täckningsmaterial med högre genomtränglighet (200-400 ppm.m), och hög koncentration av metangas för sluttningar med lite eller inget täckningsmaterial (600-1000 ppm.m). Resultaten indikerar att gas detektering med ett aktivt gas laser system kan bli ett effektivt redskap för att mäta läckage av metangas från avfallsupplag, och för kontroll och underhåll av ett avfallsupplag i syfte att ta tillvara på energin från biogasen och minska emissionen av metangas till atmosfären. Emellertid, de VOGUE-lasersystem som använts i försöken har en begränsad räckvidd (≤ 30 m) och bör betraktas som "spotmeters". För längre räckvidd krävs kraftfullare lasrar.

Räckvidden på lasersystem som skall användas i fält är normalt begränsad p.g.a. säkerhetsregler för att förhindra ögonskador. Om man kombinerar ett lasersystem med ett högupplösande, långvågs- bildgenererande IR-system bör det vara möjligt att använda IR-systemet för att detektera och visualisera läckage av biogas från avfallsupplag, och samtidigt använda laser-systemet för att mäta gaskoncentrationen vid läckagekällan.

Refererande till resultaten från VOGUE-projektet och från fältförsöken utförda vid Filborna avfallsupplag föreslås genomförandet av ett FoU-projekt uppdelat i ett trestegs-projekt med en kontinuerlig utvärdering av resultaten som bas för fortsättning av påföljande delprojekt, enligt nedan.

Delprojekt 1.

Inom delprojekt (1) utförs upprepade, samtida och jämförande mätningar med ett aktivt gaslaser-system och ett passivt, högupplösande IR-system för ett urval sektioner av Filborna avfallsupplag med olika lager av känd låg till hög-genomtränglighet i täckningsmaterial. Fältmätningarna görs företrädesvis under olika väder- och utstrålningsförhållanden för att kartlägga systemens för- och nackdelar vid mätning under verkliga fältförhållanden. Typen av deponier, typ och tjocklek på de olika lagren täckningsmaterial vid Filborna avfallsupplag är väl kända och dokumenterade för de olika sektionerna hos upplaget. Filborna avfallsupplag bör kunna användas som ett testområde för fältlaborativ forskning med ett upplag med väl kända och bekräftade fältdata.

Resultaten från delstudien, etapp 1, utvärderas och resultatet används som bas för planering och genomförande av en fördjupad studie, delstudie 2.

Delprojekt 2.

Liknande mätningar med laser respektive IR-system som i delprojekt (1) planeras att utföras i delprojekt (2), men för 4 olika avfallsupplag, några med sektioner med kända täckningsmaterial, andra sektioner mindre kända, okända, respektive utan täckningsmaterial. De 4 avfallsupplagen som skall ingå i studien skall vara lokaliserade i olika delar av landet, i olika klimatzoner, preliminärt från Malmö i söder till Gävle i norr.

Resultaten från mätningarna i delprojekt (2) utvärderas och utgör del av basen i ett internationellt FoU-projekt med tyngdpunkt i både energirelaterade och miljörelaterade aspekter på emissioner av metangas från avfallsupplag.

Delprojekt 3.

Det internationella FoU-projektet i delprojekt (3) planeras att inkludera forskning kring biogasens beteende hos avfallsupplag, och uppgradering av existerande laser och IR-teknologi och fältmetoder, anpassade till slutanvändarnas behov. Utarbetandet av instruktioner (guidelines) för användning av fjärranalysteknologi och fältmetoder samt överföring av kunskap (knowledge transfer) mellan industri- och utvecklingsländer kommer att prioriteras.

Den slutliga utformningen av FoU-projektet inom delprojekt (3) planeras att göras gemensamt av de intresserade parterna/länderna inom ramen för en internationell arbets- och referensgrupp.

Potentiella partners/länder som har aviserat sitt intresse att medverka i det internationella FoU-projektet är: Sverige, England, Ryssland, Tyskland och Finland. Delprojekt (3) har ännu inte aktivt presenterats för avfallsupplagens slutanvändare, nationellt eller internationellt.



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