

MARTS 2015
ENERGISTYRELSEN

DRIVHUSGASEMISSIONER FRA BIOGASANLÆG

MARTS 2015
ENERGISTYRELSEN

DRIVHUSGASEMISSIONER FRA BIOGASANLÆG

PROJEKTNR. A064249
DOKUMENTNR. 002
VERSION 3
UDGIVELSESDATO 23.03.2015
UDARBEJDET DRC, TNES, AANG, GUHU
KONTROLLERET JWS, MMK
GODKENDT DRC

INDHOLD

1	Introduktion	7
1.1	Baggrund	7
1.2	Scope	9
1.3	Rapportens struktur	9
2	Biogas	11
2.1	Sammensætning af biogas	11
2.2	Emissionskilder	13
2.3	Biogasproduktion	15
3	Regulering	18
3.1	Danmark	18
3.2	Sverige	21
3.3	Tyskland	22
4	Målemetoder	24
4.1	Introduktion	24
4.2	Lækagesøgning	25
4.3	Kvantificering af lækage	26
4.4	Målemetoder for punktkilder	27
4.5	Telemåling	28
4.6	Lugtmålinger	32
4.7	Sammenligning af metoder	32
4.8	Målemetoder i Sveriges frivillige ordning	32
4.9	Effektivitet af metoder	33
5	Måling af Emission	35
5.1	Danske emissionsundersøgelser	35
5.2	Svenske målinger	37
5.3	Tyske målinger	40
5.4	Andre undersøgelser og evalueringer	44

6	EMISSIONER FRA BIOGASANLÆG	
6	Beregning af Emission	46
6.1	UNFCCC beregningsmetoder	46
6.2	Beregning af den nationale metanemission fra biogasanlæg	49
7	Afslutning	52
7.1	Konklusioner	52
7.2	Forslag til metode og metodeudvikling for kontrol af metanemission fra de danske biogasanlæg	53
7.3	Andre forslag til videre arbejde	54
8	Litteraturliste	55
9	Ordliste	63

1 Introduktion

COWI har fået til opgave fra Energistyrelsens Biogas Taskforce at skrive en kort redegørelse for den nuværende viden om emission af metan (CH₄), lattergas (N₂O) og flygtige kulbrinte forbindelser (VOC) fra biogasanlæg til afgang af husdyrgødning – i Danmark og nabolandene Sverige og Tyskland. Fokus i rapporten er på måleteknik og eksisterende måleresultater for især metanemission, med henblik på opskalering af eksisterende målinger til landeplan, til brug i den nationale opgørelse af drivhusgasemissioner. Rapporten inkluderer yderligere en kort redegørelse af regulering af emissioner fra biogasanlæg, og en foreløbig beregning af den nationale metanemission fra biogasanlæg, baseret på tilgængelige data.

Formålet med denne rapport er at danne grundlag for Energistyrelsens fortsatte arbejde omkring drivhusgasemissioner fra biogasanlæg, måling og regulering heraf samt kortlægning af emissioner.

1.1 Baggrund

Danmark udarbejder årligt opgørelser af de danske drivhusgasemissioner (GHG) under FNs rammekonvention om klimaændringer (UNFCCC) og Kyotoprotokollen, samt under EU's forordning om overvågningsmekanisme af drivhusgasemissioner (MMR). Opgørelserne udarbejdes af Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE, Aarhus Universitet), i overensstemmelse med retningslinjerne for rapportering og revision fra International Panel on Climate Change (IPCC), og med bidrag fra adskillige danske institutioner. Opgørelserne og fremgangsmåden beskrives i en årlig rapport "*National Inventory Report*" (Nielsen et al., 2014). UNFCCC gennemgår årligt opgørelserne, for at kontrollere fremgangsmåden og overensstemmelse med IPCC-retningslinjerne med henblik på en løbende forbedring af drivhusgasopgørelserne.

Metan (CH₄) og lattergas (N₂O) er vigtige drivhusgasser, med et globalt opvarmingspotentiale (GWP) der har hhv. 25 og 298 gange stærkere virkning på strå-

lingsbalancen end kuldioxid (CO₂) over en 100-års tidsramme (IPCC, 2007)¹. Opgjort i CO₂-ækvivalenter (CO₂e) er landbruget, næst efter energisektoren, den anden største kilde til drivhusgasemissioner i Danmark og bidrager med 19% af drivhusgasemissionen i 2012 ekskl. ændringer i arealanvendelse (LULUCF). De største bidrag til drivhusgasemissionen fra landbruget kommer fra CH₄ og N₂O. I 2012 bidrog landbruget med hhv. 77% og 90% af den samlede danske udledning af CH₄ og N₂O (Nielsen et al., 2014).

Gødningshåndtering bidrog i 2012 med 18% af den totale drivhusgasemission fra landbruget (Nielsen et al., 2014). De senere år har anvendelse af gylle til produktion af biogas medvirket til en reduktion i emissionen af CH₄ og N₂O. Det medfører forkortet lagring af rågylle, og afgasset gylle spredt på landbrugsjord afgiver mindre CH₄ og N₂O, end rågylle. Disse reduktioner er indregnet i Danmarks drivhusgasopgørelse, men metoden har mødt kritik fra FN.

DCEs nuværende metode til beregning af udledningen af metan (CH₄) fra lagret husdyrgødning baseres på en reduktionsfaktor for biogasbehandlet gylle i forhold til ubehandlet husdyrgødning (Nielsen et al., 2014, sektion 6.4). Hidtil er der regnet med at metanemissionen er hhv. 23 % lavere for kogylle, og 40 % lavere for svinegylle, der er afgasset i biogasanlæg end for ikke-behandlet gylle. Reduktionsfaktorerne bygger på data fra en model beskrevet af Sommer et al. (2001, 2004).

Ved FNs årlige gennemgang af Danmarks drivhusgasregnskab er beregningsmetoden blevet kritiseret, og FN har stillet kritiske spørgsmål om hvorvidt Danmark kan verificere reduktionsfaktoren via aktuelle data fra biogasanlæggene. Energistyrelsens Biogas Taskforce har derfor igangsat en række projekter i 2014-2015, som skal bidrage til et bedre datagrundlag for beregninger af emission fra håndtering af husdyrgødning der afgasses i biogasanlæg.

Nielsen og Gyldenkærne (2014) har fremlagt et forslag til en ny opgørelsesmodel for metan udslip fra husdyrgødning leveret til biogasanlæg. Den foreslås bygget op af følgende tre komponenter:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{stald/fortank}} + E_{\text{biogasanlæg}} + E_{\text{efter_afgassing}}$$

Hvor:

E_{tot}	Samlet emission fra bioafgasset husdyrgødning og anden afgasset biomasse, kg CH ₄ /år
E_{stald/fortank}	CH ₄ emission fra stald og fortank inden afhentning, kg CH ₄ /år
E_{biogasanlæg}	CH ₄ emission fra lækager i biogasanlæg fra både husdyrgødning og anden tilsat biomasse, kg CH ₄ /år

¹ GWP for CH₄ og N₂O var vurderet til hhv. 21 og 310 i den 2. IPCC vurdering (*Second Assessment Report*, IPCC 1996) som gjaldt i Kyotoprotokollens 1. forpligtigelsesperiode, 2008-2012. De nye værdier 25 og 298 er fra IPCCs 4. vurdering (*Fourth Assessment Report*, IPCC 2007).

E_{efter_afgasning} CH₄ emission fra husdyrgødning og anden tilsat biomasse under lagring efter bioafgasning indtil udbringning samt evt. efter udbringning, kg CH₄/år

1.2 Scope

Denne rapport omfatter metanemission fra gård- og fællesbiogasanlæg, der anvender gylle. Dette er den midterste komponent – $E_{\text{biogasanlæg}}$, – i ovenstående ligning. Emissioner fra udnyttelse af biogas ved forbrænding i gasmotorer til el- eller varmeproduktion er ikke inkluderet.

Den videnskabelige litteratur om måling af metanemission fra biogasanlæg er forholdsvis ny og begrænset i forhold til antallet af måleundersøgelser af metanemission fra affaldsdeponier og spildevandsrensningsanlæg. Da nogle af de samme målemetoder, der bruges ved affaldsdeponier og spildevandsrensningsanlæg også kan bruges ved biogasanlæg, har vi også refereret til litteratur vedrørende disse anlægstyper.

1.3 Rapportens struktur

Rapporten er opbygget i 8 kapitler med følgende indhold:

1 Introduktion

En kort indledning til rapportens formål, baggrund, scope og struktur.

2 Biogas

Kapitel 2 indledes med en oversigt over sammensætningen af biogas og de klima- og miljømæssige effekter af komponenterne i biogas. Dette efterfølges af et sammenfatning af kilderne til emission ved et biogasanlæg og en statistisk oversigt over biogasanlæg og biogasproduktion i Danmark, Sverige og Tyskland.

3 Regulering af Emission

Kapitel 3 beskriver situationen vedrørende regulering af metanemission fra biogasanlæg i Danmark, Sverige og Tyskland.

4 Målemetoder

Kapitel 4 omhandler metoder til identifikation og måling af emissioner og lækage fra biogasanlæg.

5 Målinger af Emission

Kapitel 5 er en gennemgang af litteraturen om undersøgelser og målinger af emissioner fra biogasanlæg i Danmark, Sverige og Tyskland.

6 Beregning af Emission

Kapitel 6 skitserer UNFCCCs beregningsmetode for CH₄ og N₂O emission fra biogasanlæg CDM projekter, og præsenterer foreløbige beregninger af metanemission fra danske biogasanlæg, baseret på de tilgængelige data, til brug i DCEs opgørelse af nationale drivhusgasemissioner.

7 Afslutning

Kapitel 7 opsummerer hovedpunkter i rapporten, og præsenterer forslag, til det videre arbejde omkring måling, beregning og regulering af emissioner fra biogasanlæg.

8 Litteraturliste

9 Ordliste

2 Biogas

Dette kapitel indledes med en oversigt over sammensætningen af biogas og de klima- og miljømæssige virkninger af komponenterne i biogas. Dette efterfølges af et sammenfatning af kilderne til emission fra et biogasanlæg. Kapitlet indeholder yderligere en statistisk oversigt over biogasanlæg og biogasproduktion i Danmark, Sverige og Tyskland.

2.1 Sammensætning af biogas

Biogasproduktion ud fra organisk materiale er en kompleks proces, som foregår over forskellige stadier. Komplekse organiske stoffer nedbrydes i en reaktor til mindre dele, som for eksempel proteiner, kulhydrater og lipider. Disse nedbrydes yderligere til flygtige syrer, CO₂ og brint. Endelig dannes metan. Den typiske sammensætning af biogas fra gylle er primært metan (61%), CO₂ (37%) og vanddamp (2%). (Arrhenius og Johansson, 2012). Normalt er denne blandede gas mættet med vanddamp og kan indeholde støvpartikler.

Sammen med metan og kuldioxid kan biogas indeholde forurenende stoffer i mindre mængder. Hvis disse stoffer findes i større mængder kan de medføre driftsproblemer på biogasanlægget (korrosion, etc.), samt under forbrænding af gassen, hvis de forurenende stoffer stadig er tilbage efter rensning. Biogassens indhold af forurenende stoffer varierer meget afhængigt af hvilket materiale, der er blevet ud-rådnet og under hvilke forhold.

Rasi (2009) undersøgte sammensætningen af gårdbiogas fra fem forskellige gård-biogasanlæg, der anvender forskellige substrater. Det totale VOC-indhold var forholdsvis lavt. VOC identificeret i biogas fra kombinationen af kogøgødnings og affald fra konfekturindustri var aromatiske kulbrinter (benzen, toluen), disulfider og siloxaner. Methanthiol og dimethylsulfid (DMS) dannes ved nedbrydningen af svovlholdige aminosyrer (til stede i gylle) og fra den anaerobe methylering af sulfid.

Gårdbiogas indeholdt større mængder af forskellige reducerede svovlforbindelser end deponigas og biogas fra et spildevandsrensningeanlæg. Biogas produceret på gårdanlæg indeholdt en mindre mængde VOC (5 til 8 mg/m³) end deponigas (46 til 173 mg/m³) og biogas fra affaldsbehandlingsanlæg (13 til 268 mg/m³). (Arrhenius og Johansson 2012),

Organiske silicium forbindelser påvises normalt kun i lave koncentrationer i biogas fra biogasanlæg, når slam fra rensningsanlæg ikke anvendes som råvare (Rasi et al 2011).

Halogenerede forbindelser, som ofte findes i deponigas, findes sjældent i biogas fremstillet af spildevandsslam eller organisk affald. (Rasi 2009).

Tabel 1 viser sammensætningen af hovedbestanddelene af biogas fra gylle i sammenligning med deponigas.

Tabel 1 Sammensætning af biogas fra gylle og deponigas. Kilder: Petersson & Wellinger (2009), Allegue og Hinge (2012).

Bestanddel		Enhed	Biogas fra gylle	Deponigas
CH ₄	Metan	vol-%	55 – 70	35 – 65
CO ₂	Kuldioxid	vol-%	30 – 45	15 – 50
H ₂	Brinte	vol-%	0	0-3
N ₂	Kvælstof	vol-%	~ 0,2	5 – 40
O ₂	Ilt	vol-%	0	0 – 5
H ₂ S	Svovlbrinte	ppmv	0 – 4000	0 – 200
NH ₃	Ammoniak	ppmv	~ 100	~ 5
	Siloxaner	ppmv	< 0,4	0,1 – 4
C ₆ H ₆	Benzen	mg/m ³	0,7 – 1,3	0,6 – 2,3
C ₇ H ₈	Toluen	mg/m ³	0,2 – 0,7	1,7 – 5,1

Forurenende stoffer i biogas vil emitte sammen med metan og kan medføre en risiko for sundhed og miljø eller bidrage til drivhuseffekten og dermed den globale opvarmning.

Benzen er et kræftfremkaldende VOC, med en EU grænseværdi i udeluft (5 µg/m³ årgennemsnit). Toluen påvirker nervesystemet.

Emission af ammoniak i biogas bidrager til eutrofiering, forsuring og dannelse af sekundære fine partikler i atmosfæren.

Lattergas (N₂O) findes normalt ikke i biogas produceret i lukkede reaktorer pga. mangel på ilt, man kan forekomme hvis luft indblandes i reaktoren, eller fra åbent efterlagertank for afgasset biomasse. Lattergas er en meget kraftig drivhusgas, med GWP 298. Efterlagertanke i Danmark er som regel lukket.

Udslip af biogas med svovlforbindelser og lugtende kulbrinter kan give lugtgener i omgivelserne. Gylle-baseret biogas indeholder typisk svovlforbindelser, og koncentrationen er ofte højere end i deponigas eller biogas fra spildevandsanlæg. Lugt

kan således være et problem for nogle gylle-baserede biogasanlæg placeret i nærhed af boliger.

Siloxaner kan omdannes til siliciumdioxid partikler, der vil virke som et slibemiddel i gasmotorer og give stor slitage.

2.2 Emissionskilder

Emission af metan, N₂O og VOC fra biogasanlæg kommer hovedsagligt fra en række diffuse og ikke-diffuse kilder, som deles i to hovedgrupper: ventilation/skorsten, og lækager.

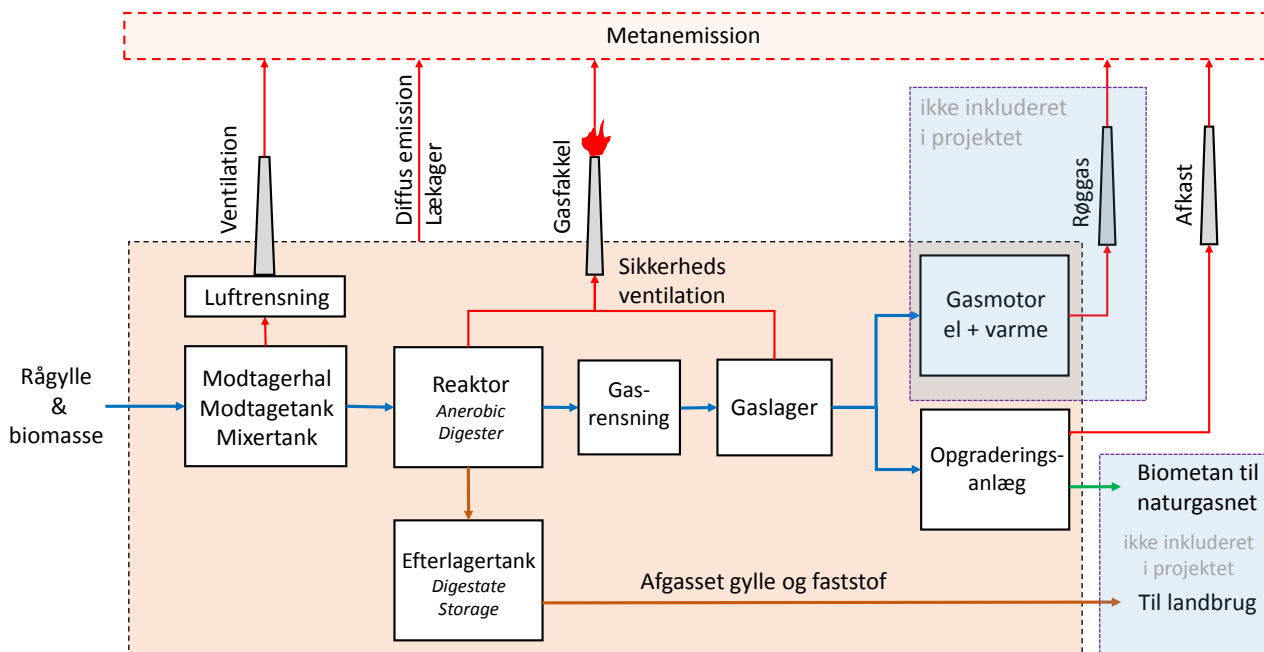
1 Emission fra ventilation og skorsten:

Ventilation	Ved modtagerhallen for rågylle og andre steder på biogasanlægget fortages der forceret ventilation for at sikre undertryk når porte mv. åbnes, med henblik på at undgå lugtgener. Et luftrensesystem, såsom biofilter, er ofte tilknyttet ventilationssystemet. Afhængigt af effektiviteten af luftrensesystemet, kan mindre mængder metan emitteres sammen med ventilationsluften.
Gasfakkel	Ved nødsituationer forbrændes metan, som ikke kan holdes i systemet, i en gasfakkel. En del metan emitteres på grund af ikke fuldstændig forbrænding.
Opgraderingsafkast	For biogasanlæg med en opgraderingsenhed emitteres der en del metan sammen med udstødningsgasser fra rensnings- og opgraderingsprocesser. Emissionen fra ventilation og skorsten er medført af normal drift af processen. Ved nyere opgraderingsprocesser er metanemission oftest mindre end 0,5 % af rågassen, men kan være op til 6 % ved ældre teknologier.

2 Emission fra lækage

Biogas kan emitteres fra produktionsudstyr og rørledninger på grund af lækage forårsaget af utætheder, huller og diffusion gennem dækningsmembran over biogasbeholdere. Denne del af emissionen er ikke-kontrollerbar og er i høj grad afhængig af typen af det anvendte procesudstyr og vedligeholdelsen heraf.

Figur 1 viser komponenterne af et biogasanlæg og de primære emissionskilder. Der er en kort forklaring af komponenterne efter figuren.



Figur 1 Oversigt over biogasanlæg, processer og emission af CH_4 til luft.

Oplag af råmaterialer

Der er emission af CH_4 ved modtagelse og oplag af gylle. Der er normalt kun korttidsopbevaring af gylle ved fælles biogasanlæg i Danmark, inden det indføres i anlægget, så metanemissionen herfra vil være lav.

Reaktor

Emission af bl.a. CH_4 afhænger af typen af overdækning. Emissionen er forholdsvis lav fra velholdte og gastætte overdækninger. Emissioner fremkommer primært fra dårligt vedligeholdte service- og inspektionsporte, dårligt design eller fra rørføringer af dårlig kvalitet. Desuden har typen af overdækningen betydning. For folieoverdækkede tanke har det betydning, hvilken tykkelse, folien har samt hvor meget den er fyldt ud. For anlæg med fleksible folieoverdækninger viser undersøgelser tab på 0,02 % til 0,07 % af den producerede CH_4 (Dumont et al, 2013). Emissioner kommer ofte hvor dugen er hæftet på beton. I Danmark har mange reaktorer stål- og glasfibertage, som kan gøres 100 % tætte. Der kan dog opstå lækage fra rør, pakninger, ventiler osv. fra et ellers gas-tæt anlæg.

Opgradering af biogas

Der er en vis emission af CH_4 i forbindelse med opgradering af biogas. Undersøgelser har vist tab på 0,5 % til 6,0 % af den totale CH_4 . (Dumont et al, 2013). Med anvendelse af nyere teknologi kan metanemission fra opgraderingsanlæg holdes under 0,2% af rågassen.

Opbevaring af afgasset gylle

Afgasset gylle kan opbevares midlertidig i åbne eller lukkede tanke, indtil borttransporteret til anvendelse på landbrugsjord. I lukkede tanke kan metanemissionen opsamles. Opbevaring i åbne tanke kan medføre betydelig emission af metan,

gasser og lugt, afhængigt af opbevaringstid, temperatur og restgaspotentiale. I Danmark er de fleste efterlagertanke lukkede.

Der kan også opstå metanemission i mindre mængder fra håndtering og indførelsessystemet for gylle (fx. transportbånd, snegl, fødeapparat, dosering og mixing). På de fleste danske biogasanlæg indpumpes gylle direkte i reaktortank eller fortank, i et lukket system, for at minimere lugtgener og metanemission.

De diffuse emissioner er vanskelige at måle. Da der ikke findes standardiserede metoder til måling og opgørelser af diffuse emissioner kan forskellige målinger udført efter forskellige metoder vise varierende resultater (se kapitler 4 og 5). Dette medfører, at regulering af diffuse emissioner er vanskelig. Via målinger kan kilder og reducerende tiltag dog vurderes.

2.3 Biogasproduktion

Dette afsnit opsummerer biogasanlæg og deres produktion i Danmark, Sverige og Tyskland. Produktion er opgjort i petaJoule (PJ) pr. år, baseret på energiindhold i den producerede gas.

2.3.1 Danmark

Biogasanlæggene i Danmark inddeles i kategorier omfattende:

- › Biogasanlæg ved renseanlæg
- › Biogasanlæg hos industrien
- › Biogasanlæg på lossepladser
- › Fælles biogasanlæg
- › Gårdbiogasanlæg

Tabel 2 viser en oversigt over typer af biogasanlæg i Danmark samt deres biogasproduktion i PJ i 2013. Energistyrelsen har endvidere kendskab til 28 planlagte biogasprojekter, og udvidelser af 22 eksisterende anlæg (Energistyrelsen 2014).

Tabel 2 Biogasproduktion i Danmark i 2013 fordelt på anlægstype. Fællesanlæg og gårdbiogasanlæg er baseret på husdyrgødning. Kilde: Energistyrelsen.

Anlægstype	Antal anlæg	Energiindhold i produceret biogas	
		PJ	%
Renseanlæg	53	0,97	21
Industriogasanlæg	6	0,20	4
Lossepladsgasanlæg	29	0,21	5
Fælles biogasanlæg	21	2,31	50
Gårdbiogasanlæg	47	0,95	20
i alt	156	4,64	100

Fælles biogasanlæg og gårdbiogasanlæg har den lighed, at de bl.a. omsætter gylle. De omsætter også andre biomasser. Tilsammen står disse to anlægstyper for ca. 70 % af den samlede biogasproduktion i Danmark.

Der findes syv biogas opgraderingsanlæg i Danmark (IEA Bioenergy Task 37, 2014), hvor biogas renses for vand, H₂S og anden forurening, og gassen opgraderes til naturgas brandteknisk kvalitet ved fjernelse af CO₂, så den rene gas kan injiceres i naturgasnettet. Anlægget i København har kun rensning af biogas, da bygasnettet kræver ikke opgradering til naturgaskvalitet. Tabel 3 viser data for de danske opgraderingsanlæg. Vi har ikke data for biogas produktionen fra opgraderingsanlæggene.

Tabel 3 Biogas opgraderingsanlæg i Danmark. Kilde: IEA Bioenergy Task 37 (2014).

Sted	Substrate	Anvendelse	CH ₄ (%)	Teknologi	Kapacitet Nm ³ /h rågas	Opført
København	Spildevandsslam	Bygasnet	60*		1800	2013
Fredericia	Spildevandsslam	Naturgasnet		Vand scrubber	300	2011
Hashøj	Gylle, bioaffald	Kraftvarme- produktion	99	Kemisk adsorption	250	2011
Hjørring	Gylle, halm	Naturgasnet	97	Vand scrubber	1800	2014
Hjørring	Gylle	Naturgasnet	97	Vand scrubber	500	2014
Horsens	Gylle, bioaffald, slagteri affald	Naturgasnet	97	Vand scrubber	2800	2014
Skive	Gylle, energi afgrøder, bioaffald	Naturgasnet	97	Kemisk adsorption	1200	2014

* Biogas tilført bygasnettet er rensset, men ikke opgraderet.

2.3.2 Sverige

I Sverige findes der i dag ca. 264 biogasanlæg, der producerer omkring 6 PJ biogas pr. år, hvilket er 31% mere end produktionen i Danmark. Hovedparten produceres af slam fra renseanlæg og affald (se Tabel 4 nedenfor). 54 % af gassen opgraderes, 31 % anvendes til varmeproduktion, 3 % benyttes til elproduktion, mens 11 % afbrændes ved gasfakkel. Gasfakkel-afbrænding bidrager til emission af drivhusgasser. (Biogasportalen, 2014)

Tabel 4 Biogasproduktion i Sverige i 2013 fordelt på anlægstype. Kilde: Persson, 2014.

Anlægstype	Antal anlæg	Energiindhold i produceret biogas	
		PJ/år	%
Slam fra rensningsanlæg	137	2,42	40
Bioaffald	23	2,09	34
Landbrugsanlæg	39	0,28	5
Industrialanlæg	5	0,42	7
Lossepladsanlæg	60	0,86	14
I alt	264	6,07	100

2.3.3 Tyskland

I Tyskland findes der i dag ca. 10.020 biogasanlæg, der producerer omkring 148 PJ varme og el pr. år (Linke 2014). Tabel 5 viser fordelingen af antal anlæg samt energiproduktion blandt anlægstyperne i Tyskland i 2013. Landbrugsbiogasanlæg udgør 79% af de samlede biogasanlæg i Tyskland, og producerer 87% af den totale energi fra biogas. Antallet af biogasanlæg er steget kraftigt de seneste år - ikke mindst på grund af støtteordninger med baggrund i den tyske lov om vedvarende energikilder (EEG). De tyske landbrugsanlæg, i modsætning til de danske, er baseret på en meget høj andel energiafgrøder, f.eks. majs.

Tabel 5 Biogasproduktion i Tyskland i 2013 fordelt på anlægstype. Kilde: Linke, 2014.

Anlægstype	Antal anlæg	Energiproduktion (PJ/år)			
		El	Varme	El + Varme	%
Slam fra rensningsanlæg	1400	4,7	6,3	11,0	7
Bioaffald	180	3,1	1,3	4,4	3
Landbrugsanlæg	7960	90,4	38,0	128,4	87
Industrialanlæg	80	1,6	0,7	2,3	1,5
Lossepladsanlæg	400	1,9	0,3	2,3	1,5
I alt	10.020	101,8	46,5	148,3	100

Der er 160 opgraderingsanlæg i Tyskland, inkl. 14 nye anlæg i 2014 (IEA Bioenergy Task 37, 2014). Det er en fordobling i antallet af opgraderingsanlæg siden 2011.

Kapaciteten er næsten 200.000 m³ i timen (rågas), hvilket er 3,5 gang større end i 2011. Forbundsregeringens mål er at kunne udskifte 6 milliarder kubikmeter naturgas med biometan i 2020.

3 Regulering

Dette kapitel opsummerer situationen omkring regulering af emissioner af metan fra biogasanlæg i Danmark, Sverige og Tyskland. De primære grunde til, at emissioner fra biogasanlæg skal minimeres er sikkerhed (brand, eksplosion og sundhed), forebyggelse af udledning af drivhusgasser og luftforurenende stoffer, lugtgener og økonomi (tab af produktet).

3.1 Danmark

Helgren (2014) har i sin masterafhandling opsummeret danske regler for biogasanlæg under miljø- og planlovgivning. De fleste regler stammer fra EU direktiver.

Emissioner af luftforurenende stoffer

Emissioner til luft fra danske virksomheder reguleres i henhold til Miljøstyrelsens Luftvejledning (Miljøstyrelsen 2001), der fastsætter grænseværdier for emission og bidrag til koncentration i udeluften omkring virksomheden (B-værdier, Miljøstyrelsen 2002). Overholdelse af B-værdier dokumenteres normalt ved brug af den danske spredningsmodel OML, som en del af ansøgningen til miljøgodkendelse. B-værdier er etableret på basis af en sundhedsrisikovurdering. Nogle B-værdier får lavere værdier af hensyn til lugtgrænser.

Metanemission reguleres ikke i Luftvejledningen – dvs. der er ikke en B-værdi for metan. Der er B-værdier for lattergas (N_2O , 1 mg/m³), svovlbrinte (H_2S , 0,001 mg/m³) og forskellige VOC, såsom benzen (0,005 mg/m³) og toluen (0,4 mg/m³).

Diffuse emissioner, såsom lækage, reguleres heller ikke i Luftvejledningen. Luftvejledning siger:

"Emissioner i form af diffuse udslip, som f.eks. emissioner fra udendørs oplag er ikke omfattet af vejledningen. Disse emissioner skal i stedet reguleres ved krav til virksomhedernes drift og indretning." (Miljøstyrelsen 2001, afsnit 2.2)

Bedst tilgængelig teknologi (BAT)

Danske biogasanlæg reguleres i forhold til Industriel Emission Direktiv (IED, EU 2010) og bedst tilgængelig teknologi (BAT) i *Waste Treatment BREF* (WT-BREF,

EIPPCB 2006). WT-BREF inkluderer ikke specifikke BAT-tekniker for diffus metanemission fra biogasanlæg, men generelle WT-BREF afsnit med relevans for biogasanlæg er:

- › 3.2.3 Emissions from biological treatments
- › 4.6.2 Leak detection and repair programme [mht VOC emission fra opløsningsmidler o.l.]
- › 4.6.22 Odour reduction techniques
- › 4.6.23 Odour management in biological treatment plants
- › 5.1 Generic BAT
 - › BAT nr. 1: EMS (Environmental Management System)
 - › BAT nr. 3: good housekeeping procedures
 - › BAT nr. 35-41: Air emission treatments
- › 5.2 BAT for specific types of waste treatments
 - › BAT nr. 65: storage and handling in biological systems

Klima- og energiplaner

Der er opstillet en række politiske klima- og energiplaner, som et bredt flertal i Folketinget står bag. Energiaftalen fra 2012² er en opfølgning på energiaftalen fra 2008 og Danmarks energipolitiske EU-forpligtelser, der tilgodeser de politiske målsætninger for klimaindsatsen frem til 2020.

De nationale mål af direkte eller indirekte relevans til udvikling af gyllebiogasanlæg i Danmark er:

- › EU har besluttet, at der skal tilsættes 5,75 % biobrændstof til benzin i 2012 og i 2020 skal vedvarende energi andelen i transportsektoren i EU være 10 %;
- › Det fremgik af "Grøn Vækst"-aftalen fra 2009 at op til 50 % af husdyrgødnin-gen skulle kunne udnyttes til energiformål inden 2020;
- › Energi- og Klimaministeren har opfordret til, at naturgassen udfases og erstattes af ikke-fossile brændsler;
- › Ifølge regeringsstrategien skal fossile brændsler være ude af el og varmesek-toren i 2035 og alle fossile brændsler udfases inden 2050; og
- › Regeringen har sat et mål om 40 % reduktion af CO₂-udledningen i 2020;
- › Ressourcestrategien "Danmark uden affald" har som mål at genanvende halvdelen af husholdningsaffaldet i 2022. Dette mål kan bl.a. nås ved at bioaf-gasse det organiske affald frem for at brænde det.

Metanemission og lækage

Bekendtgørelsen om standardvilkår i godkendelse af listevirksomhed (BEK nr 682 af 18/06/2014, Bilag I, afsnit 16, listepunkt J 205) inkluderer standardvilkår for bio-

² <http://www.kebmin.dk/klima-energi-bygningspolitik/dansk-klima-energi-bygningspolitik/energiaftale>

gasanlæg med en kapacitet for tilførsel af råmaterialer på over 30 tons pr. dag. Der er der ikke direkte krav til emissioner af metan fx. fra utætheder. Men der er vilkår, som indirekte regulerer emissioner af metan og andre gasser. Anlægget må f.eks. ikke give anledning til væsentlige lugtgener uden for virksomhedens område.

Standardvilkår 27 inkluderer: "*Beholdere og tanke skal være i god vedligeholdelsesstand. Utætheder skal udbedres så hurtigt som muligt, efter at de er konstateret.*" Visse anlægselementer skal være lufttætte og forsynet med vandlås. (se Box 1). Der er krav til månedlig eller ugentlig eftersyn af visse del af anlægget, inklusiv tæthed af overdækning. Der er ikke specifikke krav vedr. metode for lækagekontrol. Tanke skal inspiceres indvendigt for utætheder mindst hvert tiende år, og mindst hvert tyvende år af et uvildigt sagkyndigt firma.

Der er ikke grænseværdier eller andre krav vedrørende metanemission eller lækage fra danske biogasanlæg.

Box 1 Standardvilkår for biogasanlæg vedr. kontrol af lækage (BEK nr. 682 af 18/06/2014, Bilag 1, afsnit 16)

36. Virksomheden skal mindst 1 gang om måneden tilse, at den faste overdækning på beholdere med biomasse og væskefraktion slutter tæt og er tilstrækkelig vedligeholdt.
37. Beholdere og tanke til oplagring af biomasse og væskefraktion skal mindst hvert tiende år kontrolleres for styrke og tæthed af en kontrollant, der er autoriseret til at kontrollere beholdere for flydende husdyrgødning, ensilagesaft eller spildevand, jf. bekendtgørelse om kontrol af beholdere for flydende husdyrgødning, ensilagesaft eller spildevand. Resultatet af kontrollen (tilstandsrapporten) skal opbevares på anlægget sammen med dokumentation for eventuelle reparationer, mindst indtil en nyere tilstandsrapport foreligger.
- Såfremt kontrollen viser, at en beholder eller en tank ikke overholder krav til styrke og tæthed, jf. vilkår 27, eller, at der er behov for et supplerende eftersyn baseret på specialviden, behov for brug af specialværktøj eller for at beholderen tømmes, skal tilstandsrapporten indsendes til tilsynsmyndigheden inden 6 uger efter, at kontrollen er foretaget sammen med virksomhedens oplysninger om, hvad der er foretaget eller planlægges foretaget på baggrund af rapporten. Tilsynsmyndigheden kan på baggrund af tilstandsrapporten fastsætte krav om supplerende eftersyn.
38. Øvrige tanke (reaktortanke, hygiejniseringsstanke mv.) skal inspiceres indvendigt for utætheder i forbindelse med driftmæssig tømning, dog mindst hvert tiende år. En dateret beskrivelse af inspektionen og konklusionen på denne skal opbevares på anlægget mindst indtil næste inspektion.
- Endvidere skal disse tanke kontrolleres for styrke og tæthed, mindst hvert tyvende år af et uvildigt sagkyndigt firma. Rapporten fra kontrollen indsendes til tilsynsmyndigheden inden 6 uger efter, at kontrollen er foretaget sammen med virksomhedens oplysninger om, hvad der er foretaget eller planlægges foretaget på baggrund af rapporten. Tilsynsmyndigheden kan på baggrund af rapporten fastsætte krav om supplerende eftersyn.
39. Virksomheden skal mindst 1 gang om måneden foretage:
- eftersyn af luftreanseanlæg med tilhørende ventilationssystemer, jf. vilkår 13, og
 - funktionsafprøvning af gasfakkel, jf. vilkår 15.
- Virksomheden skal løbende og mindst 1 gang ugentlig kontrollere biofiltrets fugtighed og pH, jf. vilkår 14, samt temperatur.
- Utætheder og fejl skal udbedres så hurtigt som muligt, efter at de er konstateret.

Lugtgener

Da metanemission fra biogasanlæg opstår samtidigt med lugtemission, er regulering og begrænsning af lugtemission relevant i forhold til metanemission (og evt.

VOC og N₂O-emission). Krav til begrænsning af lugtgener er ofte stillet i miljøgodkendelsens vilkår, som vil også virke til at begrænse metanemission.

3.2 Sverige

Regler for methanudslip

Der er i øjeblikket ingen bindende krav eller grænseværdier for metanemissioner fra biogasanlæg (Anvisningar för biogasanläggningar, Energigas Sverige, 2012).

I 2007 indførte Sverige en frivillig ordning, hvor biogasanlæg forpligter sig til at arbejde systematisk med at identificere og reducere deres emissioner. Der har været måleperioder i hhv. 2007-2009 (omfattende 8 biogasanlæg og 20 opgraderingsanlæg) og 2010-2012 (omfattende 21 biogasanlæg og 28 opgraderingsanlæg). Ordningen omfatter blandt andet, at der regelmæssigt udføres lækagesøgninger og emissionsmålinger på de deltagende anlæg.

Målemetoderne i Sveriges frivillige ordning beskrives i afsnit 4.8, og resultaterne af målingerne opsummeres i afsnit 5.2, i denne rapport.

Lugt fra biogasanlæg reguleres efter miljølovgivningens almene hensynsregler. Alle, som driver en virksomhed, skal tage deres forholdsregler og i kommerciel sammenhæng skal den bedste miljømæssige teknik anvendes for at forebygge skader og gener. EU Direktivet om industrielle emissioner (2010/75/EU; EU, 2010) kræver brug af branchespecifikke krav til bedste tilgængelige teknik (BAT). På nuværende tidspunkt findes dog ingen opdaterede dokumenter gældende for virksomheder, som producerer biogas fra affald. Når de kommer, vil de bl.a. omfatte udslip af flygtige organiske forbindelser til luft, emission af lugt mm. (Severinsen, 2014).

Der findes ingen krav hvad angår metanemission. Visse virksomheder har vilkår for lugt. Disse vilkår har dog ingen indflydelse på, hvorvidt der kommer lugtklager (Severinsen, 2014).

Effekt af Svensk regulering

Den frivillige ordning har identificeret større og mindre lækager fra de deltagende biogasanlæg. De fleste lækager er blevet forbedret efter den første fase af målinger. Det har givet store emissionsreduktioner for de anlæg med store lækager. Der er dog ikke fundet en reduktion i gennemsnitlige procentmæssige tab af metan fra gyllebiogasanlæg (se afsnit 5.2).

Operatørenes viden om emissionspunkter og foranstaltninger er øget. I forbindelse med indkøb og godkendelsesprocesser har metanemission fået mere vægt, hvilket bidrager til at mindske metanemission. Det er dog ikke alle biogasanlæg, der er med i ordningen. Uden for ordningen står ca. 10 biogasanlæg – herunder både private og kommunale (Holmgren, 2012).

Generelt kan det siges, at viden om emissionen af metan er højere for affaldsdeponier end for rensningsanlæg og gylle-baserede gårdanlæg (Holmgren, 2012).

3.3 Tyskland

Dette afsnit omhandler regulering af emission fra biogasanlæg i Tyskland. En kilde til afsnittet er Korup (2012).

De retslige rammebetingelser for opførelse og drift af biogasanlæg er en blanding af EU-regler, lokale bestemmelser og central lovgivning. Der skal tages højde for lovgivning inden for konstruktion, byggeri, vand- og miljøbeskyttelse og affaldshåndtering. Ligeledes er forskrifter for CO₂-udledning og gødning relevant.

Tilladelse til opførelsen af et biogasanlæg afhænger af anlæggets størrelse og det tiltænkte råvaregrundlag. Byggetilladelser behandles i henhold til den enkelte delstats byggeforordning. Anlæg over en vis størrelse kræver desuden tilladelse efter den centrale lovgivning vedr. udledning, "*Bundes-Immissionsschutzgesetz*" (BImSchG), eksempelvis ved en fyringsvarmeevne over 1 megawatt, ved en gyllelagerkapacitet over 6.500 kubikmeter eller ved opførelsen af et biogasanlæg sideordnet et dyrehold på 2.000 svin eller 600 køer.

Langt hovedparten af strøm fra biogas forbruges umiddelbart der hvor den genereres. Takket være tilskuddet for elproduktion fra biomasse er produktion af strøm og varme i kraftvarmeværker i øjeblikket den foretrukne anvendelse af biogassen.

Endelig findes der regler for, hvad der må køres ud på marken efter endt produktion. Det er tale om forskrifter for affaldsstoffer og restgødning, hvori brugen af visse desinficeringsmidler ikke er tilladt, da disse kan ende i jorden.

EEG

Biogassektoren reguleres ved Tysklands lov om vedvarende energi (*Erneuerbare Energien Gesetz – EEG*). Igennem EEG støtter den tyske regering biogassektoren med offentlige midler til at udvide biogasproduktionen til strømforsyning, varmforsyningen og produktion af brændstof.

0,2 % krav

EEG indeholder ikke generelle krav eller grænseværdier for metanemission fra biogasanlæg. Der er et emissionskrav i EEG til opgraderingsanlæg for at kvalificere sig til en "bonus" tarif for biometan der ledes ud i naturgasnettet: metanemission fra opgraderingsanlæg må ikke overstige 0,2 % af den rå biogas. Dette krav kan imødekommes med nyere opgraderingsteknologi.

VDI 3475

VDI 3474 del 4 (2010) er en tysk vejledning om den bedste tilgængelige teknologi og bedste praksis for emissionsbegrænsning på gård- og fællesbiogasanlæg til anaerob fermentering og afgangning af husdyrgødning (gylle, staldgødning), energi-afgrøder (korn og majs), ensilage og planterester.

Denne vejledning fokuserer primært på den resulterende luftforurening fra lugtende og luftforurenende stoffer, støv og bioaerosols. Beskrivelsen indbefatter også den bedste tilgængelige teknologi til gasmotorer forbundet med disse faciliteter, og potentielle emissionsbegrænsende foranstaltninger, der kan anvendes ved udnyttelse af afgasset gylle og biomasse, fx. når det spredes på jorden. Et anneks til VDI 3475 del 4 angiver de tyske love og bestemmelser for godkendelse og drift af biogasanlæg i landbrug.

Med hensyn til emission og lækage fra biogasanlæg, har VDI 3474 del 4 (2010) kun kvalitative beskrivelser, da den blev udgivet før mange af de seneste måleundersøgelser blev offentliggjort. Behovet og generelle forskrifter for lækagekontrol beskrives, men der er ikke specifikke vejledninger eller metoder for lækagesøgning eller måling af emission.

TRGS 529

TRGS 529 (BAuA 2015, foreløbigt) er en tysk teknisk forskrift for arbejdssikkerhed og arbejdsmiljø ved biogasanlæg, af den tyske arbejdsmiljøinstitut (*Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*, BAuA). Forskriften omhandler regler og sikkerhedsforanstaltninger for brandfare, eksplosion og eksponeringsrisici forbundet med drift af biogasanlæg. TRGS 529 inkluderer en kort beskrivelse af vedligeholdelse, reparation og forebyggende foranstaltninger for lækage, og procedurer for lækagesøgning. Den giver ikke en detaljeret vejledning i disse procedurer.

4 Målemetoder

4.1 Introduktion

Dette kapitel indeholder en kort gennemgang af målemetoder som anvendes ved lækagesøgning og måling af emission af metan (CH₄) fra gylle-baserede biogasanlæg. Der er mindre beskrivelser af målemetoder for emission af lattergas (N₂O) og flygtige organiske forbindelser (VOC).

Mange af de samme målemetoder anvendes også ved affaldsdeponier, spildevandsanlæg, raffinerer og rørledningsnetværker, hvor emissioner af CH₄, N₂O og VOC ligeledes skal kontrolleres.

I litteraturen findes der oversigter over de målemetoder der er relevante for biogasanlæg. Anderson-Gleena og Morken (2013) opsummerer og sammenligner kvalitativt målemetoder for emission af drivhusgasser fra gyllelagertanke og biogasanlæg. Den svenske håndbog for den frivillige ordning (Holmgren 2011) beskriver målemetoderne og standard procedurer for biogasanlæg.

Mønster (2014) opsummerer målemetoder anvendt ved affaldsdeponier og spildevandsanlæg.

En håndbog i monitoring af gasemission fra danske affaldsdeponier er fornyligt udarbejdet af DTU Miljø for Miljøstyrelsen (Kjeldsen og Scheutz, 2015). Håndbogen opsummerer og evaluerer adskillige målemetoder anvendt på deponier, som kan eller har været anvendt til måling af drivhusgasemissioner fra gyllebaserede biogasanlæg.

ISO, CEN, VDI og US EPA har standard metodebeskrivelser for nogle af målemetoderne, men er kun citeret i få tilfælde.

Beskrivelse af målemetoderne for emission fra biogasanlæg opdeles i følgende emner i de følgende afsnit:

- › lækagesøgning på fx. tanke, overdækningsdug, rør, ventiler, mm.,

- › kvantificering af emission fra lækage,
- › emissionsmålinger ved traditionelle punktkilder såsom skorsten, udstødningsrør eller ventilationskanaler, og
- › telemåling af diffuse emissioner og af den samlede (integrerede) emission fra et helt anlæg.

Andre målemetoder, som ikke er omfattet af denne rapport er:

- › gasdetektion til alarmsystemer for forhøjet gaskoncentration mht. fare for sundhed, brand eller eksplosion, og
- › prøvetagning og laboratorieanalyse af den kemiske sammensætning af biogas.

De kvantitative emissionsmåleresultater fra undersøgelser og målekampagner i litteraturen opsummeres i kapitel 5.

4.2 Lækagesøgning

Emissionen som sker på grund af lækage i procesudstyr og rørledninger kan bestemmes ved forskellige metoder afhængig af praktiske forhold og betingelser. Anbefalede metoder omfatter traditionelle lækagesøgningsspray, håndholdte gasmåler, eller optisk sensor, som f.eks. kan være et metan-sensitivt IR kamera eller laserapparat.

Lækagesøgningsspray Lækagesøgningsspray i spraydåser sprøjtes på potentielle lækager, og danner en hinde eller bobler, der viser hvor gassen siver ud.

Håndholdte målere Instrumenter til lækagesøgning af metan kan være baseret på forskellige målemetoder. Almindelige metoder er halvleder sensorer eller katalytiske sensorer. Halvledersensoren består af et eller flere metaloxider og opvarmes til en bestemt temperatur, afhængigt af den gas, der skal detekteres. Når gassen rammer sensoren ioniseres gassen af metaloxidet, hvorved en forandring i ledningsevne opstår. Jo mere gas, der registreres, jo større signal giver sensoren.

Lækagesøgningssensorer med katalytiske sensorer er baseret på oxidation af gasen, der kommer i kontakt med måleinstrumentets sensor, f.eks. en opvarmet spiral wire. Som et mål for gaskoncentrationen, registreres ændring i strømmen gennem målesensoren.

Det er vigtigt at skelne mellem gasdetektorer til alarm for gaslækage, og håndholdte lækagesøgningssensorer. Gasalarmer giver et signal (lys eller lyd) når gaskoncentration overstiger en tærskelværdi, og kan ikke bruges til lokalisering af lækage. Lækagesøgningssensorer skal angive målinger på et display, og er forsynet med pumpe og sensor. De giver mulighed for at identificere stigning i gaskoncentration jo nærmere man kommer en lækage. Instrumenter med en probe

adskilt fra selve måleinstrumentet gør det nemmere at måle tættere på en potentiel lækage.

Sammensætningen af gassen som lækkes kan antages at være den samme, som sammensætningen af gassen inde i systemet. Det vil derfor være tilstrækkeligt at tage en repræsentativ prøve og analysere den med en GC (gaskromatograf). Analysen fra anlæggets normale drift kan også bruges.

Håndholdt TDLAS

Metanemission kan identificeres med en håndholdt TDLAS (*tunable diode laser spectrometer*) måler (fx. Crowcon Laser Methane Mini³). Måleren er baseret på infrarød absorptionsspektroskopi ved hjælp af en halvleder-laser til påvisning af metan. Den integrerede koncentration af metan mellem måleren og målpunktet måles ved at transmittere en laserstråle mod et reflekterende målpunkt (gas rør, loft, væg, gulv, jord, osv.) og derefter detektering af den diffuse reflekterede stråle fra målet. Den målte værdi er metandensitet i ppm•m: metankoncentrationen (ppm) gange afstand (m). Når strålen passerer gennem et læk, vises metandensitet i målerens display.

Teknikken er anvendt og vurderet af Clemens (2014) til lækagesøgning på biogasanlæg i Tyskland. Metodens krav til en reflekterende overflade gøre det besværligt at bruge til lækagesøgning (Clemens, 2014).

IR kamera

Infrarøde kameraer (fx. FLIR GF320⁴) visualiserer metanemission ved at udnytte temperaturforskellen i gasudslippet fra baggrunden. Kameraet giver et billede af det scannede område og lækager vises som røg på kameraets LCD skærm, så brugeren kan se diffus metanemission. Billedet ses i realtid og kan optages med kameraet til arkivering.

Teknikken er anvendt af Clemens (2014) i Tyskland og Kvist et al (2014) i Danmark til lækagesøgning på biogasanlæg. Metoden foretrækkes af Clemens (2014), over håndholdt TDLAS måler. IR kameraet kan opdage metanlækage ned til 11 liter CH₄ pr. time (ca 8 gram CH₄/time), men skal bruges fra forskellige vinkler, for at sikre opdagelse af alle lækager (Clemens 2014).

4.3 Kvantificering af lækage

Når en lækage lokaliseres ved en af de ovennævnte teknikker, kan andre metoder bruges til kvantificering af emissionsmængden i fx. gram pr. sekund.

Kammermetoder

Der findes to hovedvarianter i kammermetoder: lukket kammer og åbent kammer, som også kaldes stationært og dynamisk kammermetoder.

Princippet i den lukkede kammermetode er at dække eller omslutte en emissionskilde med et kammer, og måle stigningen i metankoncentrationen inde i kammeret

³ <http://www.crowcon.com/uk/products/portables/LMm-Gen-2.html>

⁴ <http://www.flir.co.uk/ogi/display/?id=55671>

over en kort tidsperiode. For målinger på en overflade – såsom overdækningsmembran, adgangsdæksel til en tank, eller gylleoverflade i en åben tank – anvendes et kammer uden bund der placeres på overfladen og om muligt forsegles. For målinger på rør, ventiler og krumme flader, anvendes en fleksible kammer eller pose til at omslutte emissionkilden.

Metankoncentrationen i kammeret kan f.eks. måles med en flammeioniseringsdetektor (FID) eller en infrarød-detektor (IR). Metanemissionen fra en overflade (også kaldet metanfluxen med enheden masse per tid og arealenhed (f.eks. $g/(m^2 \cdot \text{time})$) beregnes ud fra forøgelsen af metankoncentrationen over tiden, volumen af kammeret samt overfladearealet, som kammeret dækker. For at forhindre interferens af kammeret med emissioner, skal målingerne være kortvarige.

Denne metode har været populær på grund af sin billige pris og brugervenlige anvendelse.

Under den åbne eller dynamiske kammermetode trækkes en afmålt strøm af luft igennem kammeret, som sidder på overfladen eller er omsluttet lækagepunktet (fx rør eller ventil), og stigningen i gaskoncentration mellem indløbet og udløbet måles. Emission beregnes på basis af gas mængden og koncentrationsforskellen.

Åbent kammermetoden adskiller sig ved, at kammeret kontinuerligt skylles med luft for at undgå fejl som følge af trykopbygning og koncentrationsophobning forårsaget af emissionen fra overfladen, og for at muliggøre målinger over en længere tidsperiode.

Ulempen ved at bruge kammermetoder på overflader (fx overdækningsmembran på tanke, eller overfladen af rå eller afgasset materiale i åbne lagertanke) er deres begrænsede størrelse og manglende dækning af hele overfladen af interesse. Derfor skal resultaterne ekstrapoleres fra kammer-målingerne til hele overfladen. Hvis der opstår emissioner i "hotspots" såsom huler eller revner i overfladen, kan placeringen af kammeret resultere i over- eller undervurdering af emissionerne. Brugen af kammeret kan medføre forstyrrelse af den mikrobielle aktivitet eller den fysiske forstyrrelse af overfladen kan medføre forøget frigivelse af gas fra overfladen. Desuden kan gasstrømmen i et dynamisk kammer fremme gasudveksling, fx ammoniakfordampning.

Mikrometeorologiske metoder

En række mikrometeorologiske metoder har været anvendt til måling af metanemission fra affaldsdeponier, gyllelaguner og svinebesætninger, men metoderne er mindre velegnet til måling af emission fra biogasanlæg, og omtales ikke her.

4.4 Målemetoder for punktkilder

Emissionen som sker sammen med ventilationsluft, gasfakkel og udledning af opgraderingsanlæg, kan bestemmes ved at måle koncentration af de relevante stoffer i disse gasstrømninger og deres flow.

Måling af metan og N_2O kan gennemføres enten ved at udtrække en delstrøm fra udgangen af disse gasstrømme og måle gaskoncentration kontinuert i en gasanalytator (FTIR, FID, osv.) eller ved at tage en gasprøve og analysere den ved brug af en GC.

Da VOC er betegnelsen for en samling af mange forskellige kulbrint-indeholdende stoffer, er det mere praktisk at måle VOC ved at bruge en GC, som ofte kan bestemme de forskellige stoffer på en gang.

4.5 Telemåling

Telemåling er en metode som kan bruges til at måle den samlede emission fra anlægget ved at måle emissionskoncentrationer et stykke væk fra et anlæg i vindretningen. Der er udviklet en række telemålingsmetoder, som baserer sig på forskellige måletekniker. Der er også udviklet flere kommercielle softwares til dette formål.

Telemåling måler meget effektivt den samlede emissionsmængde fra et anlæg, men leverer ikke oplysninger om, hvor lækagestederne er.

US EPA (2011) har udgivet en håndbog om optisk telemåling til måling af diffus emission. Håndbogen har detaljerede beskrivelser af forskellige telemålingsmetoder, inklusiv anvendelsesområder, fordele, ulemper og omkostninger. De følgende afsnit giver korte beskrivelser af udvalgte teknikker, som er relevante til måling af metanemission fra biogasanlæg.

4.5.1 Radial røgfane kortlægning (RPM)

Radial røgfane kortlægning (*radial plume mapping*, RPM) anvender en kombination af laser metankoncentrationsmålinger og vindprofiler til at beregne metanemission fra et område. Det gøres ved at måle massen af CH_4 der krydser et lodret plan i vindretningen fra anlægget. De målte koncentrationer kombineres derefter med lokal vindretning og hastighed for at beregne CH_4 flux igennem det lodrette plan. Ved at placere reflektorer på begge sider af et anlæg, kan metan flux i vindretning og mod vindretning måles fra en lokation, og forskellen kan derefter bruges til at beregne metanemission fra anlægget.

En generel form for metode til telemåling af emission fra diffuse kilder er beskrevet af US EPA med betegnelsen OTM-10 (*Other test method 10*, US EPA 2006). Metoden er blevet testet og anvendt til kvantificering af metanemission fra lossepladser i USA (Abichou et al., 2010, Goldsmith et al., 2012).

En fordel ved RPM er at emissionen kan måles uden adgang til et anlæg, og at målingerne kan gennemføres på et par dage. Ulemper ved RPM er at den er følsomme over for vindmålingerne, og atmosfærisk stabilitet, som kan give betydelig usikkerhed i resultaterne. RPM måling på få timer op til et par dage er en relativt kort måleperiode i forhold til at opfange tidsmæssige variationer i emission.

4.5.2 Invers spredningsmodel metode

Inverse spredningsmodellering er baseret på en kombination af koncentrationsmålinger i vindretningen med detaljerede meteorologiske data. Ved at kende koncentrationen i vindretningen fra en kilde, og de meteorologiske spredningsforhold, kan emission fra kilden beregnes (Mønster 2014).

Inverse spredningsmodellering kan opdeles i to metoder, der anvender stationære eller dynamiske målinger. I den stationære metode, er målinger udført i et eller flere målepunkter i vindretningen fra biogasanlægget. Målingerne udføres af kontinuerlige koncentrationsmålinger eller ved opsamling over en bestemt mængde tid med efterfølgende analyse i laboratoriet.

Dynamisk invers spredningsmodellering anvender koncentrationsmålinger på tværs af metanfanen fra en emissionskilde. Metoden svarer til den dynamiske sporstof spredning metode, men gjort uden frigivelse af sporgas. De målte koncentrationsprofiler anvendes i kombination med data om atmosfæriske forhold (vindhastighed, stabilitet klasse, topografi) for at passe ind i en standard Gauss dispersion ligning til at give emission.

Ulempen ved invers spredningsmodellering er mængden af høj kvalitet input data, der er nødvendige for at få et godt emissionsestimater. Derudover er stationære målinger afhængig af vindretning. Korrekt placering af luft prøveudtagningsanordninger er af allerstørste betydning. Ulemperne ved dynamisk tilgang er behovet for specialiseret analyseudstyr, en detaljeret emissionsmodel af anlægget og adgang til veje. Nøjagtige målte og relativt stabile meteorologiske forhold er nødvendige, såsom stabil vindretning og hastighed, minimum ændring i det atmosfæriske tryk, og stabile atmosfæriske forhold vedrørende turbulens.

Fordelen ved statisk invers modellering er mulighed for lange tidsserier til at vise den tidsmæssige variation af emissionen. Den dynamiske metode har den fordel, at emissionen måles fra hele anlægget, uanset størrelsen. Generelt for modelleringsmetoder er, at der er behov for et stort antal inputparametre og kvaliteten af disse data stærkt påvirker resultatet af modelberegningerne. Nødvendige faktorer som vindhastighed og vindretning og atmosfærisk turbulens er meget varierende i tid og de rette værdier er vanskelige at få.

Telemåling med invers spredningsmodellering er meget følsom over for vind forhold og forstyrrelse af vindfeltet af bl.a. bygninger (Westerkamp 2014a,b). Teknikken er således mindre velegnet til at måle metanemission fra biogasanlæg, hvor tanke og bygninger skaber et forstyrret vindfelt vindretning fra anlægget.

4.5.3 Den dynamiske sporgasdispersionsmetode

Der har været adskillige målekampanjer for metanemission fra danske deponier (Scheutz et al., 2011c og flere). Resultaterne kan ikke direkte sammenlignes med emission fra biogasanlæg, men teknikken har viste sig meget lovende, mht. omkostningseffektivitet, robusthed og lav usikkerhed. Metoden kan være velegnet til anvendelse på biogasanlæg. C. Scheutz (2015, pers. comm.) har bidraget til følgende beskrivelse og vurdering af den dynamiske sporgasdispersionsmetode.

Sporgasdispersionsmetoden er baseret på samtidige målinger af atmosfæriske koncentrationer af metan og en sporgas frigivet med en kendt frigivelsesrate på kilden. Det antages, at metan og sporgas har samme skæbne (spredning, kemisk/fotokemisk omsætning) i luften inden for det tidsrum, hvor målingen foretages. Af denne grund er sporgasser med relativt lange levetider i atmosfæren ofte blevet anvendt, såsom svovlhexafluorid (SF_6), lattergas (N_2O), acetylen (C_2H_2) og kulilte (CO) (Galle et al., 2001; Green et al., 2010; Scheutz et al., 2011b; Mønster et al., 2014a; 2014b). Under en kontrolleret frigivelse af sporgas, måles metan og sporgas i fanen i vindretningen fra kilden, og den totale emission fra kilden kan da bestemmes ud fra forholdet mellem metan og sporgas, og frigivelsesraten af sporgas. Sporgasdispersionsmetoden kan udføres med en stationær eller dynamisk tilgang.

Den dynamiske Sporgasdispersionsmetoden er baseret på kontinuerlig måling af koncentrationen af metan og sporgas nær jordoverfladen i transekter dækkende hele fanen med efterfølgende integration af koncentrationsprofilerne af metan og sporgas. Udstyret kan monteres i en bil, som kører på en vej i vindretningen fra anlægget, som vist i Figur 2. For at bruge denne metode kræves et analyseudstyr med høj opløsning (kan måle småkoncentrationsforskelle i ppb) og kort responstid (kan måle med kort tidsinterval i sekunder) såsom en FTIR (*Fourier transform infrared spectroscopy*) eller CRDS (*cavity ring-down spectrometry*).



Figur 2 Den dynamiske sporgasdispersionsmetode. Kilde: C. Scheutz, DTU Miljø, med tilladelse.

Metoden har været anvendt på en række danske deponeringsanlæg (Mønster et al., 2014b), svenske deponier (Börjesson et al., 2009), og amerikanske deponier (Green et al., 2010). I september 2014 blev metoden anvendt til at måle metanemission fra et biogasanlæg i Sverige. Resultaterne er del af en større sammenligningskampagne og forelægges ikke offentligt endnu.

Metoden er endvidere blevet videreudviklet til at kvantificere metanudslip fra flere kilder tæt på hinanden ved brug to eller flere sporgasser (Scheutz et al., 2011a, Mønster et al., 2014a).

Fordele

Fordelen ved den dynamiske sporgasdispersionsmetode er enkelheden i tilgangen. Når fanerne af metan og sporgas er fuldt opblandet, er analyse og beregning af

emissionen forholdsvis enkel. Det dynamiske i metoden ligger i at analyseudstyret er mobilt, idet at det er placeret i en bil. Mobiliteten gør det muligt til at dække hele fanen i vindretningen, og en ændring i vindretningen vil hurtigt blive opdaget, hvorefter der kan korrigeres herfor ved at ændre, hvor der tages prøver.

Metoden måler den totale emission fra kilden inklusiv emissioner fra hotspots og installationer på anlægget, og kan anvendes uafhængig af anlæggets udformning eller struktur. Metoden kan anvendes for anlæg i alle størrelser.

Metoden kan også anvendes til at forbedre inputdata til invers spredningsmodellering af metanemissionen, f.eks. ved at bruge sporgasmålinger til at bestemme dispersionsparametre til at øge nøjagtigheden ved anvendelse af en spredningsmodel til bestemmelse af emissionen, i forhold til brug af meteorologiske målinger et sted til at bestemme dispersionsparametrene.

Udbydere af sporgasdispersionsmetoden vurderer at den er ret præcis - ved udførelse af 10 traverseringer af fanen og under optimale måleforhold (afstand til kilde og vindforhold (hastighed og retning)). Under sådanne forhold vurderes det at standardvariationen på den målte emission ofte kan holdes under 10%. Dette baseres på erfaring fra målinger på deponier og spildevandsanlæg, men er endnu ikke verificeret på biogasanlæg.

Målingerne kan udføres af én mand. En målekampagne tager ca. 6-7 timer: en time til screening af interfererende metankilder og bestemmelse af baggrund, en time til opsætning af sporgasser, tre timer til udførelse af fane-traverseringer, og ½ time til nedpakning (primært indsamling af sporflasker).

Ulemper

Ulempen ved metoden er at den er afhængig af vindforholdene (vindhastighed og retning), samt afgangforhold i form af kørbare veje, hvilket kan gøre det vanskeligt at måle på kilder med begrænset adgang og få omkringliggende veje.

Metoden kan ikke bruges til at kvantificere emissionen fra individuelle hotspots på anlægget. Udbyderne vurderer dog at metoden som regel godt anvendes til at identificere emissionskilder på anlægget ved at køre med måleudstyret på anlægsområdet og i randområdet af anlægget.

Tilstedeværelse af andre interfererende metankilder som gylletanke, staldanlæg, komposteringsenheder kan forstyrre målingen.

Måleudstyret er relativt dyrt i anskaffelse på grund af den høje følsomhed og driften af udstyret kræver høj ekspertise.

En yderligere ulempe er, at målingerne normalt udføres over nogle timer (2-6 timer) måske over et par dage, og dermed kan det være en udfordring af fange den tidsmæssige variation i metanemission.

4.6 Lugtmålinger

Oxbøl (2014) beskriver metoder til begrænsning af lugt samt en beskrivelse af metoder til lugtmåling. Lugtemission fra et biogasanlæg er tæt forbundet med metanemission, så måling og begrænsning af lugt vil være relevant for metanemission. Lugtmålingerne omtales ikke yderligere i denne rapport.

RefLab anfører endvidere: "*Der findes ingen danske eller europæiske krav til udførelse af præstationsmålinger eller stikprøver på udslip fra diffuse udslip. Dette skyldes formodentlig, at det ofte er meget vanskeligt at kvantificere det diffuse udslip ved hjælp af målinger*". (Oxbøl 2014).

4.7 Sammenligning af metoder

Vi har ikke fundet sammenligninger i litteraturen af målemetoder udført på gyllebiogasanlæg. Der er en igangværende undersøgelse med sammenligninger af målemetoder for metanemission fra et svensk biogasanlæg, men resultaterne er endnu ikke offentliggjort.

4.8 Målemetoder i Sveriges frivillige ordning

Inden for den frivillige ordning (beskrevet under sektion 3.2) gennemføres systematisk lækagesøgning med jævne mellemrum (mindst en gang per år). Dette gøres med et lækagedetektionsinstrument (f.eks. halvleder-sensorer eller katalytiske sensorer), lækagesøgningsspray (dette sprayes på f.eks. flangesamlinger - ved lækage vil de begynde at boble), visuelkontrol og lugtkontrol (varm gas giver fugtplet på komponent og kold gas giver en frostplet- efter regn kan man se bobler ved lækage). Lækagedetektionsinstrumentet benyttes ved potentielle emissionspunkter og eventuelle detektioner noteres i en journal (Holmgren, 2012).

Hvert 3. år skal målinger udføres af en tredje part. Ved hvert emissionspunkt gennemføres en måling, hvis resultat ekstrapoleres til en årsværdi for metanemission ved hjælp af information omkring anlæggets flow (Holmgren, 2011, 2012). De anlæg, som er med i den frivillige ordning findes i Holmgren (2012).

Metankoncentrationer måles ved hjælp af *Flame Ionization Detector* (FID, udstyret med enhed som bortfiltrerer andre kulbrinter) som kan måle i intervallet fra nogle få ppm op til 10 vol%. For højere koncentrationer kan en gasprøve udtages i en pose og analyseres på en GC på laboratoriet. Et bærbart lækagesøgningssinstrument kan anvendes, hvis indholdet er mindre end 0,1 % af den totale mængde i anlægget og mindre end 10 % af de totale tab (se ovenfor) (Holmgren, 2011, 2012).

Emissionsmåling i ventilationsluft giver et samlet billede af diffuse emissioner fra flere komponenter i det ventilerede rum (Holmgren, 2011). For at kunne kvantificere den totale emission fra f.eks. en ventilationskanal behøves information om gasflowet. Gasflow i en kanal er relativt vanskeligt at måle. Den mest udbredte metode er ved hjælp af "*Pitot tube measurements*" i hvilken gasens hastighed og tværsnittet anvendes. Flowet fra en ventilationsåbning kan bestemmes med et "*sensitive hot wire instrument*". Gasflowet kan også estimeres ved hjælp af data for ventilato-

rer (hvis disse anvendes), eller ved hjælp af standardværdier (Holmgren et al., 2012).

I 2011 eksisterede der ingen etablerede metoder til gasflowmålinger fra en åben eller delvis åben tank. I forbindelse med Sveriges frivillige ordning pågår et arbejde med at lave standardiserede tilgange og metoder til at bestemme metanemission fra kilder, som ikke kan bestemmes med traditionel måleteknik (indhold og flow). Holmgren et al (2013) evaluerer og sammenligner tre metoder til at bestemme metanemission fra gyllelager på pilotanlæg. Metoderne sammenlignes med en lukket kammermetode som reference. Metoderne som blev vurderet var to åben kammer metoder samt en passiv prøvetagningsmetode med hætte:

- › Isolerede flowkamre (Isolation Flux Chamber) ifølge US EPA
- › Vindtunnel ifølge VDI (Verein Deutscher Ingenieure, Tyskland)
- › Passiv prøvetagningsmetode ifølge biofiltermetodik
- › Referencemetode (lukket kammer)

Resultatet viste, at den passive hætte udgik efter første forsøg, da det viste sig at være meget svært at måle de lave lufthastigheder i røret, samt at vindens påvirkning var stor. For at resultatet skulle give retvisende værdier, måtte prøvetagningen være mindst 30 minutter med både EPA og VDI-metoden. I det næste trin planlægges måling foretaget på fuldskalaanlæg. (Holmgren, 2013) Estimering af metantab fra en åben tank kan også beregnes ved hjælp af temperaturen i tanken, og den gennemsnitlige mængde i laget (Holmgren, 2011).

Ved opgradering med enkelt gennemløb i en vandskrubber kan metanindholdet måles i en vandprøve. Vandet indesluttet i et rør, som efterfølgende varmes op så gassen overgår til en gaspose. I en recirkulerende vandskrubber måles metanindholdet i restgassen fra strippertårnet (Holmgren, 2011).

CEN standard for måling af diffus VOC emission

Inden for petroleum- og olieindustrien, hvor procesudstyr, tanke osv. ofte står udenfor, har man i mange år anvendt statistiske metoder til opskalering ved undersøgelser af tab fra lækager. En CEN standard, EN 15446:2008 (CEN, 2008), beskriver dette. Standarden omhandler VOC emission, men dele af standarden er også anvendelig på biogasanlæg (Holmgren, 2011).

4.9 Effektivitet af metoder

Måleusikkerheden er afhængig af teknik og anlæggets udformning. Usikkerhederne er koblet til forskellige fejlkilder, så som flowmåling og fysisk tilgængelighed. Rågas er mættet med vanddamp og indeholder urenheder, såsom snavs og partikler, som kan påvirke nøjagtigheden af målingen. Måling af opgraderet gas giver et mere pålideligt resultat (Holmgren, 2011).

I permanent installeret analyseudstyr vurderes der at være tab på 0,04% i gennemsnit. Usikkerheder i målingerne betragtes som +/- 10-20% af læsning på rotameter (flowmåling). Ventilationstab anses for at være vanskelig at måle. Usikkerheden anses for at variere +/- 5-50 % (Holmgren, 2012).

Der er betydelig usikkerhed i emissionerne fra det afgasset gylle, hvis det opbevares i åbne lagertanke. Usikkerheden menes at være på +/- 25-100%. Usikkerheden af tabene fra den resterende gas fra opgraderingen er mindre, da de kan måles på en kontrolleret måde, +/- 5-25%.

5 Måling af Emission

Dette kapitel omhandler resultater af målinger på biogasanlæg i Danmark, Sverige og Tyskland.

5.1 Danske emissionsundersøgelser

Vi har kendskab til en enkelt dansk undersøgelse af metanemission fra gyllebaseret biogasanlæg – en igangværende undersøgelse udført af AgroTech og Dansk Gasteknisk Center (DGC).

5.1.1 AgroTech/DGC undersøgelse

AgroTech og DGC er i gang med en undersøgelse af metanemission fra 10 biogasanlæg (Jørgensen, 2014; Kvist, 2014). Programmet inkluderer lækagesøgning med IR kamera, og måling af emission af metan i to omgange. Efter målingerne i den første fase, har operatørerne forbedret de fleste identificerede lækager. Målinger i den anden fase viser effektiviteten af forbedringerne. Præliminære resultater er offentliggjort (Kvist, 2014), men den endelige afrapportering forventes til juni 2015. Resultaterne fra den første fase vises i Tabel 6. Tilsvarende resultater fra den anden fase er ikke tilgængelig i skrivende stund.

Der er fundet overraskende mange større lækager på nogle af de større fællesbiogasanlæg – i et enkelt tilfælde på op til 10% af metan produktionen. Det var ellers forventet at de større anlæg vil have bedre styr på lækage (Kvist, pers. komm.). I en lignende undersøgelse af svenske biogasanlæg (Petersson, 2012) er der også fundet nogle "outliers", med metanudslip op til 10% af produktionen, især i de første tre år (Holmgren, 2014) (se også sektion 5.2), og den danske erfaring står derfor ikke alene.

Som grundlag for beregning af den nationale metanemission, er undersøgelsen fra AgroTech/DGC et udmærket start. Der er dog begrænsninger i undersøgelsen mht. opskalering af resultaterne til alle gård- og fællesbiogasanlæg:

- › Set i lyset af det store variation i målt metantab, er de 10 biogasanlæg et begrænset sample (15%) af de 68 biogasanlæg baseret på gylle.

- › Målingerne inkluderer ikke sikkerhedsventilation, gasfakler, eller opgraderingsanlæg.
- › Kun resultaterne fra de første målinger er tilgængelig i skrivende stund.
- › Der er ikke fundet sammenhæng i mellem
 - › emission og anlæggets alder,
 - › emission og anlæggets størrelse, og
 - › emission og operatørens forventning for emission.

Ikke desto mindre, er disse resultater de bedste informationer om metantab fra danske biogasanlæg, på nuværende tidspunkt.

Tabel 6 Metantab fra 10 danske biogasanlæg, i forhold til biogas produktion. Første målinger, inden reparation. (Kvist et al., 2014)

Anlæg Nr	Anlægstype	Antal Læk	Emission 1000 Nm ³ /år	Produktion 1000 Nm ³ /år	Metantab %
1	Gårdanlæg	10	1,6	300	0,6 %
2	Gårdanlæg	4	4,4	500	1,0 %
3	Gårdanlæg	0	0	100	0,0 %
4	Gårdanlæg	5	3,9	500	0,8 %
5	Gårdanlæg	2	10	1.200	0,9 %
6	Fællesanlæg	3	28	1.300	2,1 %
7	Fællesanlæg	14	276	4.900	5,7 %
8	Fællesanlæg	3	123	1.200	10,0 %
9	Fællesanlæg	11	131	3.900	3,4 %
10	Fællesanlæg	-na-			
	5 Gårdanlæg	21	19,9	2.600	0,8 %
	4 Fællesanlæg	31	558	11.300	4,9 %
	Alle 9 anlæg	52	577,9	13.900	4,2 %
	Gennemsnits tab				2,7 %

5.1.2 DTU Miljø's undersøgelse af drivhusgasemissioner fra spildevandsrensning

DTU Miljø har i 2012/13 udført emissionsmålinger på Spildevandscenter Avedøre, hvor slam afgasses i en rådnetank (Yoshida et al, 2014). Der er udført i alt ni målekampanjer, hvor den samlede emission af metan og N₂O fra anlægget blev kvantificeret vha. den dynamiske sporstofdispersionsmetode (se afsnit 4.5.3). Undersøgelsen handler ikke om gyllebaserede biogasanlæg, men erfaring med målemeto-

den på en rådnetank er relevant. Metanemissionen blev målt til mellem ca. 5 kg/time op til 92 kg/time. De målte metanemissioner udgjorde mellem 2 og 33 % af den samlede metanproduktion på anlægget. De høje emissioner blev observeret i perioder, hvor anlægget oplevede driftsproblemer. Usikkerhed ved målingerne af den samlede metanemission fra anlægget vurderes at være ca 10 % (Yoshida et al., 2014).

Fra 2013 til 2015 har DTU Miljø målt metan og N₂O emissioner vha. sporstofdistributionsmetoden fra yderligere syv spildevandsrensaneanlæg alle med rådnetanke. Undersøgelserne pågår stadig, og resultaterne er endnu ikke afrapporteret. Der er målt metanemissioner på mellem 3 og 30 kg/time (Scheutz, pers. kommunikation).

I 2013/14 har DTU Miljø målt emissioner fra tre anlæg, der behandler organisk affald (husholdningsaffald, haveaffald og industriaffald) og producerer biogas. To af anlæggene har kombineret aerob/anaerob behandling, mens et anlæg kun har anaerob behandling. På alle tre anlæg sås væsentlige emissioner af metan (20 til 40 kg/time) (Scheutz, pers. kommunikation).

5.1.3 Danske firmaer/institutioner der måler metanemission

Følgende danske firmaer/institutioner arbejder med måling af metanemission fra biogasanlæg:

- › AgroTech – www.agrotech.dk
- › FORCE Technology – www.forcetechnology.com/da/
- › Eurofins – www.eurofins.dk/dk/milj0/vores-ydelser/luftemission.aspx
- › DGC – www.dgc.dk/emissionsmaaling
- › DTU Miljø – www.env.dtu.dk

5.2 Svenske målinger

I forbindelse med dette afsnit er der indhentet erfaringer fra SP – Sveriges Tekniska Forskningsinstitut samt fra litteraturen.

5.2.1 Svenske aktører

I Sverige findes der forskellige aktører inden for måling.

DGE mark och miljö udfører målinger af metanemission (og andre parametre) fra biogasanlæg. Målingerne udføres i henhold til Avfall Sveriges rapport B2011:01 – *Handbok metanmätningar* (Holmgren 2011) med hjælp af fourier transform infrarød spektrometri (FTIR) samt FID (flamionisationsdetektor). (www.dge.se)

METLAB	er et akkrediteret luftlaboratorium, som er specialiseret inden for måling af emissioner til luft fra industrier, varmegærker, kraftværker og affaldsforbrændingsanlæg. De kan udføre gasanalyser af biogas og deponigas via direkte målinger af samtlige aktuelle gaskomponenter (O ₂ , CO ₂ , CH ₄ og H ₂ S). (www.metlab.se)
Cleanair Europe	er en virksomhed, som leverer bærbare gasanalyser til måling af CH ₄ , CO ₂ , O ₂ and H ₂ S. (www.cleanaireurope.com)
FluxSense	hører under Chalmers Tekniska Högskola. FluxSense kan udføre in situ lækagesøgninger og total kortlægning af siteemissioner. (http://www.fluxsense.se/)

5.2.2 Resultater fra det frivillige program

Under den første fase af målinger i 2007-2009 blev metantabet fra biogasanlæg bestemt til 1,6% som gennemsnit i forhold til den producerede mængde rågas. I 2010-2012 blev gennemsnittet bestemt til 1,9%. Stigningen menes at skyldes at flere emissionskilder var blevet opdaget frem for en reel stigning i emissionerne. I opgraderingsanlæg var de gennemsnitlige metantab 2,7% for 2007-2009 og 1,4% for 2010-2012. Faldet skyldes at der er foretaget foranstaltninger til mindskelse af udslip samt at nyetablerede anlæg er indrettet med moderne teknologi (Holmgren, 2012).

For de anlæg, som ikke har egne målinger har den svenske gasbranche fastsat en standard værdi for tab på hhv. 2,5 % for biogasanlæg og 2,1 % for opgraderingsanlæg (Holmgren, 2014). Anlæggene kan benytte denne værdi ved beregning af emissioner.

Krav til målinger

Resultatet af metanmålinger ved biogasanlæg i Sverige inden for den frivillige ordning, angives som procentvist tab i forhold til mængden af rågas som produceres på anlægget. For opgraderingsanlæg angives tabet i forhold til den opgraderede gas som produceres. Anlæggene er kategoriseret efter hvilken opgraderingsteknik, der anvendes, samt om de har en såkaldt *end-of-pipe* løsning, hvor metanen i restgassen destrueres i f.eks. en RTO (*regenerative thermal oxidizer*) (Holmgren, 2012).

Tabel 7 viser resultaterne fra den frivillige kontrol program for biogasanlæg i Sverige (Holmgren, 2012). Resultaterne er vist for den første runde af målinger, og for de seneste målinger i 2012, hvor den anden runde var ikke gennemført på alle anlæg. Usikkerhed i målingerne vurderes i programmet at være ± 25-100%. For biogasanlæg, var den største kilde til biogastab oplagring af afgasset biomasse (digestate storage).

Tabel 7 Resultater for biogasanlæg i den svenske frivillige kontrol program for biogasanlæg. Kilde: Holmgren (2012).

Anlægstypen	Antal	Procent tab, i forhold til produktion af rågas	
		1. runde (2007-2009)	Seneste (2007-2012)
Spildevandsanlæg (inkl. affald)	7	2,7 %	1,9 %
Biogasanlæg	13	0,8 %	1,8 %
Alle	20	1,6 %	1,9 %

Tabel 8 viser resultaterne for opgraderingsanlæg i den frivillige kontrol program i Sverige, opdelt efter opgraderingsteknik.

Tabel 8 Resultater for opgraderingsanlæg i den svenske frivillige kontrol program for biogasanlæg. Kilde: Holmgren (2012).

Teknik	Antal	procent tab, i forhold til produktion af ren gas	
		1. runde (2007-2009)	seneste (2007-2012)
Pressure swing adsorption (PSA)	4	2,5 %	2,5 %
Vand scrubber	13	3,2 %	2,1 %
End-of-pipe	5	1,7 %	1,0 %
Kemisk adsorption	7	0,4 %	0,2 %
Alle	29	2,7 %	1,4 %

Energiforsk projekt

Energiforsk⁵ (tidligere SGC, Elforsk, Fjärrsyn, Värmeforsk) har et igangværende internationalt projekt om sammenligning og evaluering af målemetoder til kvantificering af metanemission fra biogasanlæg, ledet af Magnus Andreas Holmgren. Projektet er sponsoreret af Energimyndigheten med bidrag og deltagelse af svenske, danske og tyske institutioner og virksomheder. Projektets to mål er: 1) et litteraturstudie om, erfaring med målemetoder i Europa, og 2) sammenligning og evaluering af parallelle emissionsmålinger på et biogasanlæg i Sverige, udført af fire on-site teams og to telemåling teams. Rapportering af resultaterne forventes midt i 2015.

⁵ <http://www.energiforsk.se/>

5.3 Tyske målinger

5.3.1 Tyske undersøgelser

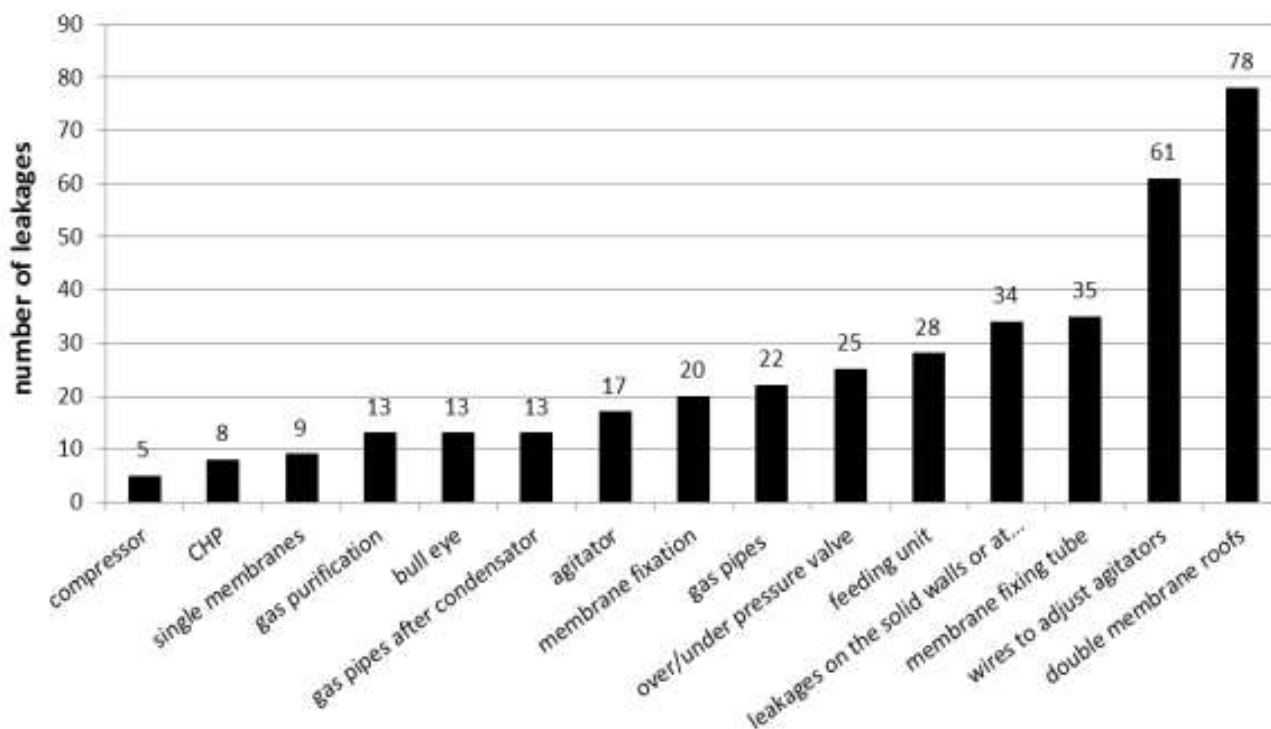
Clemens et al (2014)

Clemens et al (2014) og Clemens (2014) beskriver en tysk undersøgelse af lækage fra biogasanlæg. Formålet var at identificere antal læk, men ikke at kvantificere metanemission. Lækage kontrollen startede med IR-kamera og laser inspektion, med efterfølgende koncentrationsmålinger med bærbar CH₄ analysator. Diffusion igennem reaktormembraner blev bestemt ved 1) 20 ml gas-stikprøver i ventileret frirum mellem dobbeltfolier, eller 2) en sekvens af 3 gas-stikprøver i et lukket kammer, ved 3 steder på enkeltfolie membraner. Gas-stikprøverne blev analyseret i et laboratorie.

I alt 312 reaktorer blev analyseret, inklusiv deres enheder til forbrug af biogas – enten gasmotorer eller opgraderingsanlæg til at levere metan til gasnettet.

Resultater fra 292 reaktorer viser et gennemsnit på mere end én lækage pr reaktor. De fandt ikke nogen sammenhæng mellem anlæggets alder og antallet af lækager fundet.

De hyppigste lækager blev påvist på 78 (27%) dobbeltmembran tage på reaktorer, 61 (21%) ved wirer til justering af positionen af nedsænket omrører, 35 (12%) ved membran fastsættelsesrør, og 34 (12%) lækager på reaktorvægge eller betontage. Overtryksventilen udsendte CH₄ i 25 tilfælde. Figur 3 viser de 15 hyppigste lækager.



Figur 3

De hyppigste lækager identificeret ved 292 tyske biogasanlæg. Kilde: Clemens et al (2014).

Dobbeltfolie reaktormembraner var mest sårbare over for lækager (78 lækager). Derudover udsendte ca. 29% af de analyserede dobbeltfolie membraner mere end $3 \text{ l CH}_4 / (\text{m}^2 \text{ bar d})^6$. Kun én af de 37 enkeltmembraner (3%) viste emissioner højere end $3 \text{ l CH}_4 / (\text{m}^2 \text{ bar d})$.

Clemens et al (2014) fandt at IR-kameraet kunne identificere lækage bedre end laser måleren, men at inspektion skal foretages fra forskellige vinkler, for at kunne registrere alle lækager.

Liebetrau et al (2013) Liebetrau et al (2013) undersøgte drivhusgasemissioner fra 10 tyske biogasanlæg baseret på energiafgrøder og ko-, svin- eller kyllinggødning. Gødningsandelen på anlæggene varierede fra 25 til 94% af materialet. Undersøgelsen inkluderede to ugelange måleperioder på hvert anlæg, hvor alle produktionskomponenter var undersøgt: fortanke, indfødningsystem, reaktor, efterlagertank, gastransport og gasudnyttelse i gasmotor (8 anlæg) eller opgraderingsanlæg for tilførsel til gasnettet (2 anlæg).

Lækage blev identificeret med to håndholdte teknikker – *tunable diode laser absorption spectroscopy* (TDLAS) og flammeioniseringsdetektor (FID). Emission fra identificerede lækage blev målt ved ventileret kammer metoden – et kammer af gastætte folie omkring lækage, med ind- og udgangsrør koblet til en blaser, og måling af koncentration i ind- og udgangs gas. Metan måles med FID, N_2O med gaskromatografi, og NH_3 med elektron capture detektor (ECD).

Emission fra åbne lagertanke til udrådnet materiale blev målt ved enten et flydende lukket kammer (for CH_4 , N_2O) eller et ventileret kammer (for NH_3) på overfladen. NH_3 måles i det ventileret kammer med at føre en del af udgangsgas igennem en flaske med syreopløsning og fotometrisk analyse. I det lukkede kammer, den stigende koncentration af CH_4 eller N_2O målt ved 10 minutters intervaller bruges til beregning af strømmen af gasser ind i kammeret, og dermed emission fra overfladen. Emissioner fra tanken beregnes i henhold til arealforholdet mellem kammer og tank.

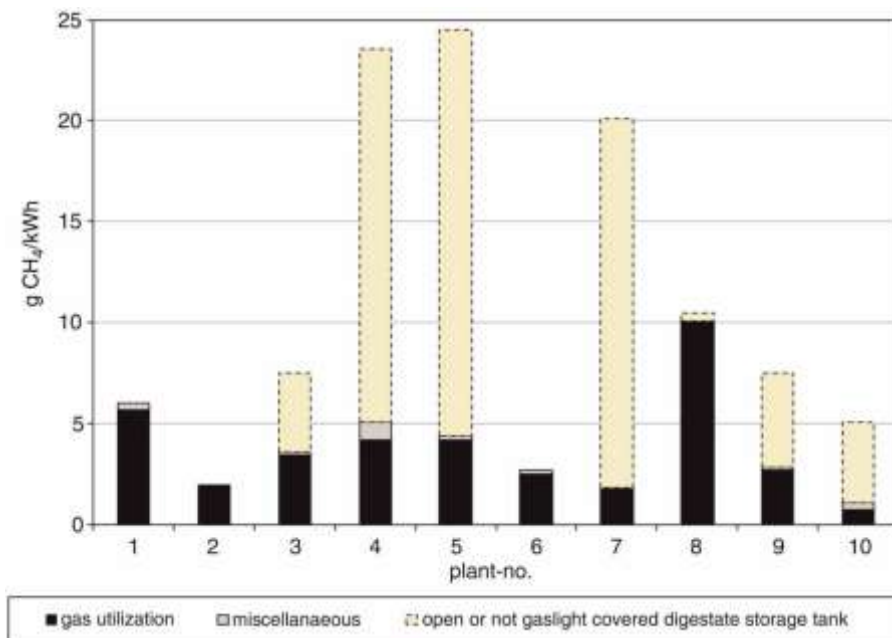
Emission fra overdækkede men ikke-gastætte lagertanke blev målt med ventilering af hele frirum af tanken under dugen, ved et bestemt strømningshastighed. Koncentration måles i udgangsgassen, og omregnes til emission.

Emission fra gasmotorer eller opgraderingsanlæg blev målt direkte i udstødningsrøret, efter tyske vejledninger VDI 4200 (VDI 2000).

Emission fra hvert komponent er beregnet i forhold til installeret kapacitet for at give emissionsværdier i henhold til energiproduktion. Målingerne blev foretaget mens anlæggene var i fuld-last drift, hvor det aktuelle output var lig med installeret kapacitet. Mængden af udnyttet metan estimeres ved at antage 40 % elektrisk effektivitet på kraftvarmeanlægget og metan energiydelse på 10 kWh/m^3 .

⁶ Enheder $\text{l CH}_4 / (\text{m}^2 \text{ bar d})$ betyder liter CH_4 pr. dag pr. m^2 af membranoverflade, pr. bar tryk i reaktoren.

Figur 4 opsummerer variation i kilderne til metanemission fra de 10 biogasanlæg. Metanemission fra de enkelte produktionskomponenter, som procent af gasproduktionen, indgår i en opsummering af Dumont et al (2013) vist i Tabel 10, baseret på resultater præsenteret i Liebetrau (2011) og Liebetrau et al (2011).



Figur 4 Primære kilder til metanemission fra 10 tyske biogasanlæg. Kilde: Liebetrau et al (2013).

Resultaterne i Liebetrau et al (2014) viste, at de primære emissionskilder er åbne lagertanke til udrådnat materiale (*digestate storage tanks*) og gasudnyttelsessystemerne. Resultaterne for de åbne lagertanke skal fortolkes forsigtigt, da de ikke repræsenterer gennemsnits emission over længere tid. Ikke desto mindre vil gastæt overdækning af lagertanke give stor reduktion af emission.

Reduktion af emission fra gasmotorer kan opnås ved hjælp af en sekundær oxidation proces, men investeringsomkostningerne er ganske høje og forhindrer udbredt anvendelse.

Undersøgelsen viste, at lækager kan forårsage store emissioner uden at blive bemærket af operatørerne.

Groth et al (2014, 2015) Groth et al (2014, 2015) anvendte telemåling til kvantificering af metanemission fra et 5 MW biogasanlæg i Rheinland-Pfalz, Tyskland. En invers spredningsmodel blev brugt til at beregne emissionshastigheder. Denne teknik bruger koncentrationsmålinger ved en *open-path tunable diode laser absorption spectrometer* (TDLAS), i vindretningen og imod vindretningen fra kilden, sammen med målinger af turbulens, vindhastighed og retning. Modellen WindTrax (Thunder Beach Scientific) anvendes til beregning af emissionshastigheder. Modellen er baseret på *backward Lagrangian stochastic* (bLs) teknik.

Under uforstyrrede driftstilstande var metanemission 2,8 g/s i gennemsnit, hvilket svarer til 4% af gasproduktionen på biogasanlægget.

Westerkamp et al
(2014a,b)

Westerkamp et al (2014a,b) rapporterer om målinger af metanemission fra tre tyske biogasanlæg med opgraderingsanlæg for tilførsel af biometan til naturgasnettet. Undersøgelsen anvendte åbne kammer metoden til måling af alle identificerede lækager, og TDLAS telemåling med invers spredningsmodel metoden til måling af det samlede metanemission fra hvert anlæg.

Ved alle tre anlæg var det samlede metanemission fra telemåling højere end målt on-site med åben kammer metoden. Det kan muligvis skyldes ikke opdagede lækager, men i forhold til måleusikkerhed, var resultaterne tæt på hinanden.

Westerkamp et al (2014a) også målte methanemission fra sikkerhedsventiler (overtryk) ved to landbrugs biogasanlæg, med gennemsnits metanemission af hhv. 0,06 % CH₄ (0.1 g CH₄ /kWh) og 3.9 % CH₄ (7.4 g CH₄/kWh). De bemærker også at driftsfejl på biogasanlæg kan medføre betydelig metanemission på årsbasis.

Westerkamp et al (2014a,b) bemærker at telemålingmetoden med invers spredningsmodel er meget følsom over for vind forhold og forstyrrelse af vindfeltet af terræn og bygninger. On-site metoder er nødvendig for identifikation og kvantificering af de enkelte emissionskilder.

5.3.2 Tyske målefirmaer

Bonalytic

Det tyske firma, Bonalytic GmbH (www.bonalytic.de) foretager akkrediterede lækageundersøgelser til brug ved officielle undersøgelser eller til at klarlægge kvalitet og forbedringspotentiale.

Bonalytic gennemfører målinger ved en kombination af forskellige metoder, herunder en indledende inspektion med et kulbrintefølsomt IR-kamera. Alle de fundne lækager evalueres bl.a. ud fra metankoncentrationen ved lækagen, tilgængelighed til lækagen, afstand til nærmeste antændelsessted, potentiel øgning af lækage og emission herfra. (http://www.bonalytic.de/accruited_leakage_detection.html) (se Tabel 9 for målemetoder benyttet af Bonalytec).

Tabel 9 Målemetoder benyttet af Bonalytec. Kilde:
http://www.bonalytic.de/accredited_leakage_detection.html

Stof	Metode
Metan, CO ₂ , ilt, nitrogen	DIN 51872-04-A
Ammoniak	i.A. VDI 3496
Hydrogensulfid	DIN 51855-4/colorimetric
Siloxaner	i.A. VDI 3865 Bl. 4 (GC.-MS)
BTEX	i.A. VDI 3865 Bl. 4 (GC.-MS)
CCH/FCHH	i.A. VDI 3865 Bl. 4 (GC.-MS)
HC C5 to C9, ≥ C10	i.A. VDI 3865 Bl. 4
Andre analyser:	
CH ₄ og N ₂ O < 100 ppm	IR eller GC
NH ₃ -Emission	VDI 3496
Formaldehyd	VDI 3862
Benzen	DIN EN 13649
TOC	DIN EN 12619/13526
NO _x	DIN 14791
CO	DIN EN 15058

5.4 Andre undersøgelser og evalueringer

Biogas Handbook

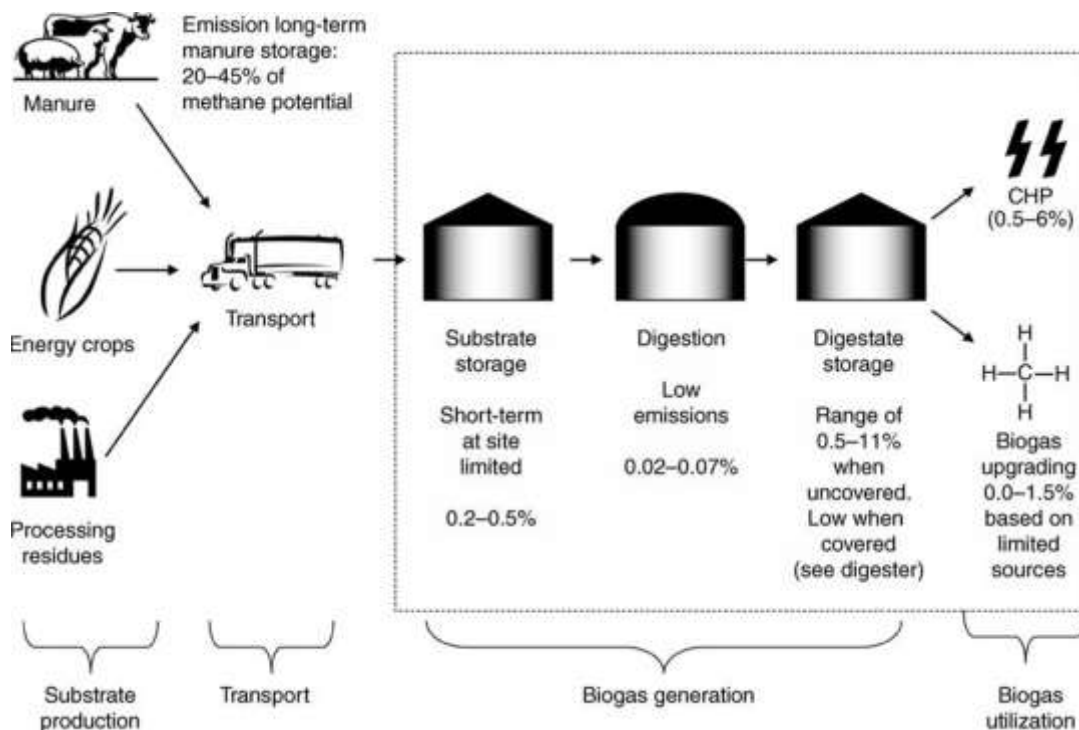
Dumont et al. (2013) gennemgår litteraturen om metanemissioner fra biogasanlæg og opsummerer måleresultater, i en kapitel af *The Biogas Handbook*. Omfanget af målingerne for de enkelte emissionskomponenter vises i Tabel 10.

Den gennemsnitlige metanemission for de forskellige emissionskomponenter er også opsummeret på et flowdiagram for et biogasanlæg i Figur 5.

Tabellen og figuren inkluderer dog ikke metanemission fra gasfakler og sikkerhedsventiler, som kan være væsentlige emissionskilder på et biogasanlæg.

Tabel 10 Rapporterede emissioner fra forskellige komponenter af biogasanlæg. Kilde: Dumont et al., 2013.

Komponent	Type	Gennemsnitligt metan tab (%)	
		Minimum	Maksimum
Silolager	—	0,00065	0,00065
Indfødningsystem	Transportbånd med snegl	0,0079	0,0079
	Fødeapparat med dosering	0,00029	0,16
	Fortank med organisk materiale	0,005	0,311
	Mixertank	0,013	0,288
Reaktor (Anaerobic Digester)	Foliedug	0,006	0,0244
	Gastætdug	0	0
	Betontag	0	0
Efterlagertank (digestate storage)	Åben efterlagertanke	0,224	11,22
	Lukket efterlagertanke	0,638	10,299
Gasanvendelse	Kraftvarmeværk (gasmotor)	0,44	2,43



Figur 5 Flowdiagram af et biogasanlæg, der viser metanemissionandele, baseret på den samlede mængde metan, som anlægget producerer. Kilde: Dumont et al (2013). Figuren omfatter ikke gasfakler eller sikkerhedsventiler, som kan være væsentlige emissionskilder.

6 Beregning af Emission

Dette kapitel skitserer UNFCCCs beregningsmetode for CH₄ og N₂O emission fra biogasanlæg CDM projekter og præsenterer foreløbige beregninger af metanemission fra danske biogasanlæg, baseret på de tilgængelige data, til brug ved DCEs opgørelse af nationale drivhusgasemissioner.

6.1 UNFCCC beregningsmetoder

UNFCCCs metode til beregning af drivhusgasemissioner fra biogasanlæg for CDM projekter beskrives i *Project and leakage emissions from anaerobic digesters, version 1.0.0* (UNFCCC, 2012a). UNFCCC CDM metoden bruges også under US EPAs protokol til kvantificering af ydeevne af gyllebiogasanlæg (Eastern Research Group, 2011).

Metoden inkluderer følgende emissionskilder:

- (a) CO₂-emissioner fra forbrug af elektricitet forbundet med driften af reaktor;
- (b) CO₂-emissioner fra forbruget af fossile brændsler, forbundet med driften reaktor;
- (c) CH₄-missioner fra reaktor, inklusiv emissioner under vedligeholdelse, fysisk lækage gennem taget og sidevægge, og slip gennem sikkerhedsventiler pga. tryk i reaktoren; og
- (d) CH₄-emissioner fra biogas fakler.

Kun (c) og (d) inkluderes i denne rapport. Beskrivelsen henviser også til UNFCCCs metodebeskrivelse for gasfakler: *Project emissions from flaring, version 02.0.0* (UNFCCC, 2012b). Metoden ser bort fra emission af N₂O fra fysisk lækage, fordi det er en mindre emissionskilde.

Metoden inkluderer også følgende kilder, under betegnelsen "leakage emissions", som ikke inkluderes i denne rapport:

- (a) CH₄ og N₂O emission fra kompostering af afgasset biomasse (digestate); og
- (b) CH₄ emissioner fra anaerob nedbrydning af afgasset biomasse i en deponi eller udsat for anaerob lagring, såsom i en stabiliseringsdam.

Box 1 *Beregning af metanemission fra reaktorer i UNFCCC metoden (UNFCCC, 2012a)*

Step 4: Determination of project emissions of methane from the anaerobic digester ($PE_{CH_4,y}$)

Project emissions of methane from the anaerobic digester include emissions during maintenance of the digester, physical leaks through the roof and side walls, and release through safety valves due to excess pressure in the digester. These emissions are calculated using a default emission factor ($EF_{CH_4,default}$), as follows:

$$PE_{CH_4,y} = Q_{CH_4,y} \cdot EF_{CH_4,default} \cdot GWP_{CH_4} \quad (4)$$

Where:

- $PE_{CH_4,y}$ = Project emissions of methane from the anaerobic digester in year y (t CO₂e)
- $Q_{CH_4,y}$ = Quantity of methane produced in the anaerobic digester in year y (t CH₄)
- $EF_{CH_4,default}$ = Default emission factor for the fraction of CH₄ produced that leaks from the anaerobic digester (fraction)
- GWP_{CH_4} = Global warming potential of CH₄ (t CO₂ / t CH₄)

UNFCCC CDM metoden specificerer standard emissionsfaktorer for den del af det producerede CH₄, som lækker fra en reaktor ($EF_{CH_4,default}$), med enheder t CH₄ slip / t CH₄ produceret. Valg af standardværdi bestemmes af typen af reaktor, baseret på oplysninger fra fabrikanten. Hvis dette ikke er muligt, anvendes faktor 0,1 (øvre del af IPCC-værdier).

- 0,028 Reaktorer af stål eller foret beton, eller glasfiber reaktorer med et gaslagersystem (ægformet reaktortank) og monolitisk konstruktion;
- 0,05 Reaktorer af typen *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB) (anvendt ved spildevandsanlæg), flydende gasholdere uden ekstern vandforsegling;
- 0.10 Reaktorer med uforet beton, ferrocement eller mursten i buetformet gaslager sektion; monolitiske fast-dome reaktorer; overdækket anaerob lagune.

Metoden anvender følgende standardværdier:

Tabel 11 Standardværdier ved UNFCCC metoden (UNFCCC, 2012a)

Parameter	Symbol	Standardværdi	Enheder
Del metan i biogassen	$f_{CH_4,default}$	0,6	Nm ³ CH ₄ / Nm ³ biogas
Massefylde af metan ved standard tilstand	ρ_{CH_4}	0,00067*	t CH ₄ / Nm ³ CH ₄
Global Warming Potential af CH ₄	GWP_{CH_4}	21 (anvendt 2008-2012) 25 (fra 2013)	t CO ₂ e / t CH ₄

* for standard tilstand 20°C og 1 atm. I Danmark anvendes normal tilstand 0°C og 1 atm.

Energistyrelsens data for danske biogasanlæg inkluderer ikke information om typen af reaktor. Uden yderligere information er man begrænset til at anvende den højeste emissionfaktor, 0,1 t CH₄/t CH₄ produceret.

Box 2 viser trin 5 i UNFCCC metoden.

Box 2 Trin 5 i UNFCCC metoden for beregning af metanemission fra gasfakler i biogas projekter.

Step 5: Determination of project emissions from flaring of biogas ($PE_{flare,y}$)

If the project activity includes flaring of biogas, then project emissions from flaring of biogas ($PE_{flare,y}$) shall be estimated using the "Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane". The following applies:

- For small scale projects, project participants may adopt a default value for the fraction of methane in the biogas ($f_{CH_4,default}$) in applying the tool; and
- The tool provides default factors for the flare efficiency, which can be used for large or small scale projects as described in the tool.

UNFCCCs procedure for beregning af emissionerne fra afbrænding af tilbageværende gas ($PE_{flare,y}$) baseres på flare-effektivitet ($\eta_{flare,m}$) og massestrømmen af metan til flare ($F_{CH_4,RG,m}$). Flare-effektivitet bestemmes for hvert minut (m) af år (y) baseret på enten måledata eller standardværdier.

Proceduren til beregning af flare emissioner har følgende trin:

TRIN 1: Bestemmelse af methan massestrømmen af den resterende gas;

TRIN 2: Bestemmelse af flare effektivitet;

TRIN 3: Beregning af projektets emissioner fra flaring.

Box 3 Trin 2 i UNFCCC metoden for gasfakler vedr. bestemmelse af gasfakkel effektivitet.

Step 2: Determination of flare efficiency

The flare efficiency depends on the efficiency of combustion in the flare and the time that the flare is operating. For determining the efficiency of combustion of enclosed flares there is the option to apply a default value or determine the efficiency based on monitored data. For open flares a default value must be applied. The time the flare is operating is determined by monitoring the flame using a flame detector and, for the case of enclosed flares, in addition the monitoring requirements provided by the manufacturer's specifications for operating conditions shall be met.

Open flare

In the case of open flares, the flare efficiency in the minute m ($\eta_{flare,m}$) is 50% when the flame is detected in the minute m ($Flame_m$), otherwise $\eta_{flare,m}$ is 0%.

Enclosed flare

In the case of enclosed flares, project participants may choose between the following two options to determine the flare efficiency for minute m ($\eta_{flare,m}$) and shall document in the CDM-PDD which option is selected:

Option A: Apply a default value for flare efficiency.

Option B: Measure the flare efficiency.

For enclosed flares that are defined as low height flares, the flare efficiency in the minute m ($\eta_{flare,m}$) shall be adjusted, as a conservative approach, by subtracting 0.1 from the efficiency as determined in Options A or B. For example, the default value applied should be 80%, rather than 90%, and if for example the measured value was 99%, then the value to be used shall correspond to 89%.

Box 4 Trin 4 i UNFCCC metoden for beregning af metanemission fra gasfakler.

Step 3: Calculation of project emissions from flaring

Project emissions from flaring are calculated as the sum of emissions for each minute m in year y , based on the methane mass flow in the residual gas ($F_{CH4,RG,m}$) and the flare efficiency ($\eta_{flare,m}$), as follows:

$$PE_{flare,y} = GWP_{CH4} \times \sum_{m=1}^{525600} F_{CH4,RG,m} \times (1 - \eta_{flare,m}) \times 10^{-3} \quad (15)$$

Where:

- $PE_{flare,y}$ = Project emissions from flaring of the residual gas in year y (tCO₂e)
- GWP_{CH4} = Global warming potential of methane valid for the commitment period (tCO₂e/tCH₄)
- $F_{CH4,RG,m}$ = Mass flow of methane in the residual gas in the minute m (kg)
- $\eta_{flare,m}$ = Flare efficiency in minute m

6.2 Beregning af den nationale metanemission fra biogasanlæg

Emissionsfaktorer EF_{CH4} baseret på UNFCCC CDM metoden, og de eksisterende danske og svenske måleprogrammer, anvendes til foreløbige beregninger af den samlede metanemission i 2013 fra de 68 danske gård- og fællesbiogasanlæg.

Energistyrelsen fører årlige statistikker over biogasproduktion i Danmark. Der beregnes biogasproduktion for hvert enkelt biogasanlæg (156 anlæg i 2013, Tabel 2). Produktion opsummeres for fem anlægstyper: Renseanlæg, industribiogasanlæg, lossepladsgasanlæg, fælles biogasanlæg, og gårdbiogasanlæg.

Den samlede 2013 biogas produktion fra de 68 gyllebaserede biogasanlæg er 3,26 PJ (Energistyrelsen). Med denne energimængde i den rå biogas, hovedsageligt fra metan, anvendes følgende parametre til omregning af PJ til metanmasse i Gg:

- › CH₄ nedre brændværdi⁷ 35,796 MJ/Nm³ CH₄
- › CH₄ massefylde 0,717 kg/Nm³ CH₄ ved normalt tilstand 0°C og 1 atm
- › Omregningsfaktor 1 PJ CH₄ = 20,03 Gg CH₄ (1 Gg = 1000 ton)

Metanproduktionen i Gg fra de 68 biogasanlæg i 2013 er dermed 65,3 Gg CH₄.

Tabel 12 viser beregninger af den samlede metanemission i 2013 fra de 68 gård- og fællesbiogasanlæg i Danmark, ved tre forskellige emissionsfaktorer for metanemission:

- › UNFCCC CDM standardværdi for stål reaktorer: 0,028 eller 2,8 %,
- › det gennemsnitlige metantab 1,8 % fra 13 biogasanlæg i det svenske frivillige program (se Tabel 7), og
- › det gennemsnitlige metantab 4,2 % fra den første fase i AgroTech/DGC undersøgelsen af 9 danske biogasanlæg (se Tabel 6).

Målingerne har ikke inkluderet opgraderingsanlæg, gasfakler eller slip fra overtryk ventilation.

Tabel 12 Sammenligning af beregninger af den Danske nationale metanemission fra 21 gård- og 47 fællesbiogasanlæg i 2013, for en årlig biogas produktion på 3,26 PJ. Emission er eksklusiv af opgraderingsenheder, gasfakler og sikkerhedsventilation.

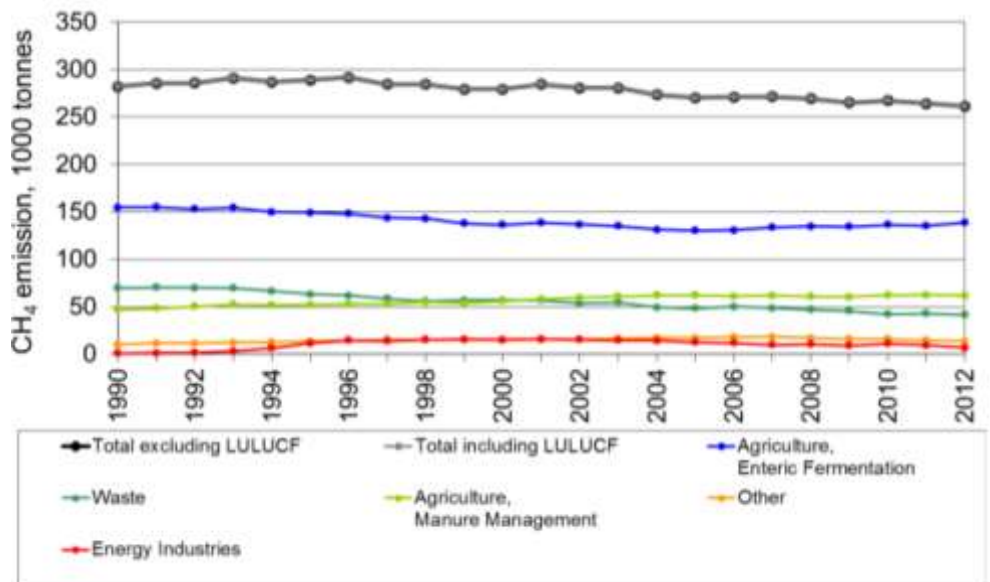
Grundlag for emissionsfaktoren	Emissionsfaktor % af biogas produktion	Metanemission		
		PJ/år	Gg CH ₄ /år	Gg CO ₂ e/år*
UNFCCC standardværdi for reaktorer af stål (UNFCCC, 2012)	2,8 %	0,091	1,83	45,7
Svenske standardværdi (Holmgren, 2014)	1,8 %	0,059	1,18	29,4
Danske målinger, 1. fase (Kvist et al., 2014)	4,2 %	0,137	2,74	68,6

* beregnet med CH₄ GWP 25.

⁷ Nedre brændværdi anvendt af Energistyrelsen, til beregning af energiindholdet i den samlede biogasproduktion.

Den samlede metanemission fra biogasanlæg i Danmark kan altså potentielt være på mellem 1,18 og 2,74 Gg CH₄ om året.

Til sammenligning viser Figur 6 udvikling af den nationale metanemission fra 1990 til 2012, opdelt i hovedsektorer.



Figur 6 Danmarks årlig CH₄ emission opdelt i hovedsektorer, 1990 to 2012. 1000 tonnes = 1 Gg. Kilde: Nielsen et al, (2014).

6.2.1 Metanemission fra opgraderingsanlæg

Der er ikke fundet produktionsdata for de syv danske opgraderingsanlæg. Der er ikke opgraderingsanlæg på de 10 danske biogasanlæg undersøgt af Agro-Tech/DGC, så der er ikke danske data for evt. metantab på danske opgraderingsanlæg. Resultaterne fra Sveriges frivillige kontrolprogram kan evt. bruges (se Tabel 8), men det kræver produktionsdata for ren gas fra opgraderingsanlæggene.

6.2.2 N₂O emission fra biogasanlæg

Der er ikke tilstrækkelige data til at vurdere evt. emission af N₂O fra danske biogasanlæg. N₂O emission fra lukket biogasanlæg er meget lille, men N₂O emission kan forekomme fra åben lagring af afgasset materiale, og fra forbrændingsgasser fra gasmotorer, især hvis biogassen indeholder ammoniak (NH₃).

UNFCCC metoden ser bort fra emission af N₂O fra fysisk lækage, fordi der er normalt meget lille N₂O emission fra gyllebiogasanlæg.

7 Afslutning

7.1 Konklusioner

- › Der findes robuste målemetoder til følgende:
 - › identifikation af lækage, og verifikation af reparationer,
 - › måling af metanemission fra de fleste former for lækage,
 - › måling af den samlede (integrerede) metanemission,men der mangler overblik over omkostningseffektivitet af de forskellige teknikker.
- › Metantab reduceres betydeligt for biogasanlæg, der deltager i måleprogrammer. Men ikke alle identificerede lækager bliver repareret.
- › Der har været målt overraskende høje metantab fra de større danske biogasanlæg. Forventet var lave emissioner.
- › I starten af både de svenske og danske måleprogrammer er der fundet "outliers", med op til 10% tab af biogas.
- › Måleprogrammer i Danmark, Sverige og Tyskland har vist, at der kan forekomme både mindre og større lækager på biogasanlæg, uden at det bemærkes af operatørerne.
- › Driftsfejl på biogasanlæg kan medføre betydelig metanemission på årsbasis.
- › Det forventes at biogasanlæg, der fører egenkontrol og forbedring af lækager vil mindske deres metanemission. Der mangler information om den faktiske brug af lækagekontrol ved danske biogasanlæg.
- › Der er behov for både måling af den integrerede metanemission og identifikation af enkelte lækagepunkter, ved biogasanlæg.
- › En sammenligning af on-site og off-site målinger af metanemission ved tre tyske biogasanlæg fandt at den total metanemission målt med on-site teknikker var mindre end målt ved telemåling, i alle tre tilfælde (Westerkamp et al 2014).

- › På basis af preliminære resultater fra AgroTech/DGC undersøgelsen (Kvist 2014), er den nuværende nationale metanemission fra gård- og fællesbiogasanlæg i 2013 ca 4,2 % af den produceret rågas (0,137 PJ/år eller 2,74 Gg/år CH₄). Det inkluderer ikke metanemission fra opgraderingsanlæg, og er eksklusiv af evt. emission fra gasfakler og sikkerhedsventilation. Standard værdier fra UNFCCC eller Svenske målinger giver lavere estimater af metanemission.
- › Der er stor usikkerhed i beregning af det nationale udslip af metan fra danske biogasanlæg, da datagrundlaget er meget begrænset, og der er ikke information om opgraderingsanlæg, gasfakler, og evt. sikkerhedsventilation.
- › Der mangler oplysninger om de enkelte anlæg for at kunne forbedre beregningsmodellen – f.eks. typen af overdækning af reaktor, indeslutning af biomasse før og efter afgang, og om operatørernes vedligeholdelse i praksis, egenkontrol og/eller brug af professionel måling af lækage, samt evt. forbedringer af lækage og opgradering af anlæggene.

7.2 Forslag til metode og metodeudvikling for kontrol af metanemission fra de danske biogasanlæg

- › Til identifikation af lækager på biogasanlæg anbefales IR kamera, lækagesøgningsspray, og håndholdte målere. Der er behov for udvikling af standardvilkår for lækagesøgning og vejledning i brug af disse teknikker for operatørerne, til at minimere metanemission fra biogasanlæg.
- › Til kvantificering af den samlede metanemission fra de danske biogasanlæg anbefales afprøvning af telemåling på basis af danske, svenske og tyske erfaringer. Det kan potentielt anvendes til periodisk kontrol af metanemission fra biogasanlæg, som supplement til inspektion og kontrol for styrke og tæthed af tanke specificeret i standardvilkår for biogasanlæg (BEK nr. 682 af 18/06/2014).
- › Sporgasdispersionsmetoden har visse fordele over andre telemålingsmetoder, men der er få målinger på biogasanlæg. En vigtig fordel er mindre følsomhed over for forstyrrelser i vindfeltet forårsaget af anlæggets bygninger og tanke, end for fx. invers spredningsmodellering. Det anbefales at afprøve sporgasdispersionsmetoden på en række danske biogasanlæg, for at vurdere metodens anvendelighed og usikkerhedsniveau, og evt. til udvikling af standard procedurer og vejledning i brug af metoden på biogasanlæg.
- › Et frivilligt program, bygget på svensk erfaring, er en mulig fremgangsmåde til opbygning af operatørernes engagement og erfaring med lækagesøgning og reparation, samtidigt med udvikling af danske måleteknisk ekspertise og erfaring, og grundlag for udvikling af standardvilkår. Et frivilligt program kunne inkludere regelmæssig lækagesøgning, måling af metanemission fra udvalgte enkelte lækager, samt telemåling af den samlede metanemission. Det foreslås

at målingerne inkludere metanemission fra ventilationsafkast, gasrensesystem, sikkerhedsventilation, gasfakler, og opgraderingsanlæg på danske biogasanlæg, med henblik på kvantificering af bidrag fra disse kilder på årsbasis.

- › Der er behov for detaljerede data om de forskellige typer af danske biogasanlæg, for at definere en fordeling af anlægstyper mht. metanemission. Hvis de nødvendige data om anlægstyper, egenskaber og lækage kontrol for de enkelte anlæg ikke eksisterer, kan de evt. indsamles ved et spørgeskema undersøgelse. Disse data vil kunne også anvendes til en forbedret beregningsmetode for den nationale metanemission fra biogasanlæg.

7.3 Andre forslag til videre arbejde

- › Informationskampagne - Danske biogasanlæg aktører (ejer og leverandører) gøres opmærksom på størrelsen af og årsag til metantab fra biogasanlæg, med tilhørende miljømæssige, klimamæssige og økonomiske omkostninger.
- › Der undersøges virkning af indførelsen af regler eller vejledninger til grænseværdier for tab fra biogasanlæg, baseret på svenske, tyske og andre erfaringer.
- › Der udarbejdes best practices for kontrol og måling af emissioner fra biogasanlæg.
- › Redegørelse for statistiske usikkerheder i måling og beregning af metantab fra biogasanlæg, og usikkerhed i den nationale total udslip fra biogasanlæg.
- › Review af vilkår for danske biogasanlæg, og forslag til vilkår mht. kontrol, måling og forbedring af lækage (miljøgodkendelse).
- › Forslag til vejledende eller bindende grænseværdier for metantab, som i Tyskland (for opgraderingsanlæg).
- › Harmonisering af vilkår og best practices for de forskellige typer af biogasanlæg.
- › Udarbejdelse af dansk vejledning om kontrol og minimering af lækage fra biogasanlæg.

8 Litteraturliste

Alle links til Internet kilder har været besøgt eller downloadet i perioden december 2014 – januar 2015.

Abichou, T, Clark, J, Tan, S, Chanton, J, Hater, G, Green, R, Goldsmith, D, Barlaz, MA, Swan, N (2010) Uncertainties Associated with the Use of Optical Remote Sensing Technique to Estimate Surface Emissions in Landfill Applications. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 60, 460–470.
(<http://dx.doi.org/10.3155/1047-3289.60.4.460>).

Allegue LB, Hinge J (2012). Biogas and bio-syngas upgrading. Danish Technological Institute (http://www.teknologisk.dk/root/media/52679_report-biogas%20and%20syngas%20upgrading.pdf).

Anderson-Glenna M, Morken J (2013). *Greenhouse gas emissions from on-farm digestate storage facilities*. Tel-Tek, for SLF (<https://www.slf.dep.no/no/miljo-og-okologisk/klima-og-miljoprogrammet/prosjekter-2013/klimagassutslipp-og-karbonbinding/attachment/36848?ts=145414fb550&download=true>).

Arrhenius, K, Johansson, U (2012). Characterisation of contaminants in biogas before and after upgrading to vehicle gas (Rapport SGC 246 - english translation). Svenskt Gastekniskt Center (SGC).
(http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC246_eng.pdf).

BAuA (2015). *TRGS 529: Tätigkeiten bei der Herstellung von Biogas [Operations in the production of biogas, provisional, February 2015]*. Committee on Hazardous Substances (AGS), Federal Ministry of Labour and Social Affairs (BAuA) (Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS); http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/AGS/pdf/TRGS-529-Neu.pdf?__blob=publicationFile&v=2).

Bennetts VH et al. (2012). Gasbot: A Mobile Robotic Platform for Methane Leak Detection and Emission Monitoring. *IROS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring (WREM)*. Vilamoura, Portugal
(http://wrem2012.isr.uc.pt/Papers/Bennetts_WREM2012.pdf).

Biogasportalen (2014). (<http://www.biogasportalen.se>).

Bonalytec (2014). (http://www.bonalytic.de/accredited_leakage_detection.html og www.bonalytic.de).

Börjesson, G, Samuelsson, J, Chanton, J, Adolfsson, R, Galle, B, Svensson, BH (2009). A national landfill methane budget for Sweden based on field measurements, and an evaluation of IPCC models. TELLUS Series B-Chemical and Physical Meteorology, 61, 424-435.

CEN (2008). EN 15446:2008 - Fugitive and diffuse emissions of common concern to industry sectors - Measurement of fugitive emission of vapours generating from equipment and piping leaks. CEN/TC 264/WG 17.

Clemens J (2014). Erfahrungen bei der Untersuchung von Biogasanlagen auf Gasdichtheit [Experience in the study of biogas plants for gas tightness]. *gwf Das Gas- und Wasserfach, Gas - Erdgas*, 155(3):128–130.

(http://www.bonalytic.de/cps/bonalytic/ds_doc/GE_03_2014_Clemens.pdf).

Clemens J, Hafermann C, Dresen D (2014). Experiences from emission analysis as a tool for plant optimization. *2nd IBBA workshop on methane emissions*. Kiel, Germany (artikel: <http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/Clemens.pdf>, og slides: [http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/Clemens\(1\).pdf](http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/Clemens(1).pdf)).

Dumont NLM et al. (2013). Kap.11 - Methane emissions in biogas production. In: Wellinger A, Murphy J, Baxter D, eds. *The Biogas Handbook*. Woodhead Publishing, 2013:248–266.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857094988500117>).

EIPPCB (2006). *Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries*.

(http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf).

Energigas Sverige (2012). Anvisningar för biogasanläggningar – BGA, 2012.

(<http://www.energigas.se/Publikationer/NormerAnvisningar>)

Energistyrelsen (2014). *Biogas i Danmark - status, barrierer og perspektiver*.

(http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/undergrund-forsyning/vedvarende-energi/bioenergi/biogas-taskforce/rapporter_taskforce/biogas_i_danmark_-_analyse_2014-final.pdf).

EU. (2010). Europa-Parlamentets og Rådets direktiv 2010/75/EU af 24. november 2010 om industrielle emissioner (integreret forebyggelse og bekæmpelse af forurening). ([http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32010L0075:EN:NOT)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32010L0075:EN:NOT](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32010L0075:EN:NOT))

Galle, B., Samuelsson J., Svensson BH, and Börjesson G (2001). Measurements of methane emissions from landfills using a time correlation tracer method based on FTIR absorption spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 35, 21–25.

Goldsmith CD et al. (2012). Methane emissions from 20 landfills across the United States using vertical radial plume mapping. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(2):183–197. (<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10473289.2011.639480>).

Green RB, Hater GR, Thoma ED, DeWees J, Rella CW, Crosson ER, Goldsmith CD, Swan N (2010). Methane emissions measured at two Californian landfills by OTM-10 and an acetylene tracer method. Proceedings of the Global Waste Management Symposium 2010, October 3-6, 2010, JW Marriott San Antonio Hill Country Resort & Spa, San Antonio, Texas, USA.

Groth A, Reiser M (2014). Optimizing the use of a TDLAS-WindTrax combination to quantify methane emission rates of biogas plants. *2nd IBBA workshop on methane emissions*. Kiel, Germany (<http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/Groth.pdf>).

Groth A et al. (2015). Determination of methane emission rates on a biogas plant using data from laser absorption spectrometry. *Bioresource Technology*, 178:359–361. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414013716>).

Helgren AB (2014). *Regulering af biogasanlæg i juridisk perspektiv -- med fokus på regelforenklning; Masterafhandling*. Aarhus Universitet (http://pure.au.dk/portal-asb-student/files/76231953/Master_opgave_21maj_MEEL2014_Anne_Helgren.pdf).

Hjort A, Bigelius J (2014). *Metanutsläpp från restgas vid uppgradering [Methane emissions from off gas during biogas upgrading]* (SGC Rapport 2014:299). Malmö Sweden: Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC). (<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC299.pdf>).

Holmgren MA (2011). *Handbok metanmätningar* (Rapport SGC 227). Svenskt Gastekniskt Center (SGC). (<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC227.pdf>).

Holmgren MA (2012). *Sammanställning av mätningar inom Frivilligt åtagande 2007-2012* (Rapport U2012:15). SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, for Avfall Sverige. (http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/Utveckling/Rapporter_2012/U2012-15.pdf).

Holmgren MA et al. (2012). The Swedish voluntary agreement for control of methane emissions from biogas plants. *Orbit2012 - Global assessment for organic resources and waste management*. Rennes, France.

Holmgren MA, Olsson H, Rodhe L, Willén A (2013). Värdering och utveckling av mätmetoder för bestämning av metanemissioner från öppna rötrestlager – pilotskaleförsök [Development and evaluation of methods for determination of methane slip from open digestate storage – pilot trials] (No. SGC Rapport 2013:274; Avfall Sverige Rapport 2013:03). Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC), for Avfall Sverige. (<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC274.pdf>).

Holmgren MA (2014). Methane Emission from Swedish Biogas Plants. *2nd IBBA workshop on methane emissions*. Kiel, Germany
(<http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/Holmgren.pdf>).

IEA Bioenergy Task 37 (2014). *Up-grading Plant List*. (http://www.iea-biogas.net/plant-list.html?file=files/daten-redaktion/download/Up-grading_Plant_List.xls)

IPCC (1996). *Climate Change 1995. IPCC Second Assessment Report*.
(http://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/English/ipcc_90_92_assessments_far_overview.pdf).

IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use, section 10 Emissions from Livestock and Manure Management* (corrected as of June 2014). In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, 2006.
(http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf).

IPCC (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007; 2.10.2 Direct Global Warming Potentials - AR4 WGI Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*.
(http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html)

Jørgensen L (2014). Methane Emission from Danish Biogas Plants. *2nd IBBA workshop on methane emissions*. Kiel, Germany
(<http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/Jorgensen.pdf>).

Kjeldsen P, Scheutz C (2015). *Håndbog i monitoring af gasemission fra danske affaldsdeponier*. Miljøprojekt nr. 1646, 2015. DTU Miljø, for Miljøstyrelsen.
(<http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/01/978-87-93283-69-5.pdf>).

Korup CH (2012). Tekst fra Ambassaden Berlin / Christina Hjorth Korup e-mail - Berlin: Tyske regler for biogas samt spørgsmålet om anvendelse af majs til biogas i Tyskland; Svar på EUK-instruktion af 20.12.2012.

Kramer R, Böckler HB (2014). Time-resolved investigation of the exhaust emissions of upgrading units. *2nd IBBA workshop on methane emissions*. Kiel, Germany
(<http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/Kramer.pdf>).

Kvist T et al. (2014). Methanemissioner fra Biogasanlæg. *Økonomiseminar*. Aarhus, Danmark, Foreningen for Danske Biogasanlæg.
(<http://www.biogasdk.dk/images/okoseminar14/Torben%20Kvist%20til%20web.pdf>)

Liebetrau J (2011). *Quantitative Bewertung von Emissionen klimarelevanter Gase aus Biogasanlagen*.
(https://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Vortraege/Vortraege_DBFZ/Vortrag_Jan_Liebetrau_VDI_Braunschweig.pdf).

Liebetrau J et al (2011). Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
(https://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Vortraege/Vortraege_DBFZ/Vortrag_Jan_Liebetrau_Vienna_31082011.pdf).

Liebetrau J et al. (2013). Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. *Water Science & Technology*, 67(6):1370–1379. (<http://www.iwaponline.com/wst/06706/wst067061370.htm>).

Linke B (2014). *IEA Bioenergy Task 37 Country Report Germany [2013 data]*. Leibniz-Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim; for IEA Bioenergy, Energy Technology Network (IEA Bioenergy Task 37 Country Reports; (http://www.iea-biogas.net/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/Oct%202014/Germany_Country_Report_10-2014.pdf).

Miljøstyrelsen (2001). *Luftvejledningen; Begrænsning af luftforurening fra virksomheder*. (<http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2001/87-7944-625-6/pdf/87-7944-625-6.pdf>).

Miljøstyrelsen (2002). *B-værdivejledningen, Oversigt over B-værdier*. Miljøstyrelsen (<http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2002/87-7972-099-4/pdf/87-7972-099-4.pdf>).

Miljøstyrelsen (2014). BEK nr 682 af 18/06/2014 - Bekendtgørelse om standardvilkår i godkendelse af listevirksomhed. (<https://www.retsinformation.dk/pdfPrint.aspx?id=162486>).

Mønster J (2014). *Quantifying greenhouse gas emissions from waste treatment facilities* [PhD Thesis]. DTU Environment (http://orbit.dtu.dk/services/downloadRegister/93263130/Jacob_M_nster_PhD_The_sis_WWW_Version.pdf).

Mønster J, Samuelsson J, Kjeldsen P, Rella CW, Scheutz C (2014). Quantifying methane emission from fugitive sources by combining tracer release and downwind measurements – A sensitivity analysis based on multiple field surveys. *Waste Management*, 34(8):1416–1428. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14001342>).

Mønster J, Samuelsson J, Kjeldsen P, Scheutz C (2015). Quantification of methane emissions from 15 Danish landfills using the mobile tracer dispersion method. *Waste Management*, 35:177–186. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14004280>).

Nielsen O-K et al. (2014). *Denmark's National Inventory Report 2014*. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, for Miljøstyrelsen (<http://dce2.au.dk/pub/SR101.pdf>).

Oxbøl A (2014). Diffuse lugtemissioner; Idékatalog (Rapport nr.: 69). Brøndby: Miljøstyrelsens Referencelaboratorium for Måling af Emissioner til Luften, FORCE Technology. (http://www.ref-lab.dk/ref-lab_docs/showdoc.asp?id=141124151959&type=doc&pdf=true)

Persson T (2014). *IEA Biogas Task 37 Country Report Sweden [2013 data]*. Svensk Gasteknisk Center AB (SGC); for IEA Bioenergy, Energy Technology Network (IEA Bioenergy Task 37 Country Reports; (http://www.iea-biogas.net/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/Oct%202014/Sweden_Country_Report_10-2014.pdf).

Petersson A (2012). *Maabjerg Biogas Plant: Operation of a very large scale biogas plant in Denmark*. SP Technical Research Institute of Sweden (IEA Bioenergy Task 37; http://www.iea-biogas.net/case-studies.html?file=files/daten-redaktion/download/case-studies/maabjerg_case_story_web_final.pdf).

Petersson A, Wellinger A (2009). *Biogas upgrading technologies – developments and innovations*. IEA Bioenergy Task 37. (http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_rz_low_final.pdf)

Rasi S (2009). *Biogas composition and upgrading to biomethane*. Dissertation. Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 202, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland. (<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/20353/9789513936181.pdf>).

Rasi S, Läntelä J, Rintala J (2011). Trace compounds affecting biogas energy utilisation – A review. *Energy Conversion and Management*, 52(12):3369–3375. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890411001968>).

Rylander H, Wiqvist W (2011). *Frivilligt åtagande - inventering av utsläpp från biogas- och uppgraderingsanläggningar, Reviderad 2011* (Rapport U2007:02). Avfall Sverige. (http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/Utveckling/U2007-02_rev_2011.pdf)

Scheutz C et al. (2011a). Gas production, composition and emission at a modern disposal site receiving waste with a low-organic content. *Waste Management*, 31(5):946–955. (Landfill Gas Emission and Mitigation; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10005465>).

Scheutz C, Samuelsson J, Fredenslund AM, Kjeldsen P (2011b). Quantification of multiple methane emission sources at landfills using a double tracer technique. *Waste Management*, 31(5):1009–1017. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1100047X>).

Seadi TA (2014). *IEA Task 37 Country Report Denmark [2012 data]*. IEA Bioenergy, Energy Technology Network (IEA Bioenergy Task 37 Country Reports; http://www.iea-biogas.net/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/Oct%202014/Denmark_Country_Report_10-2014.pdf).

Severinsen E (2014). *Tillståndsvillkor och luktförekomster vid biogasanläggningar i Sverige [Permit conditions and odour occurrences on Swedish biogas plants]* (SGC Rapport 2014:298). Malmö Sweden: Svenskt Gastekniskt Center AB. Retrieved from <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC298.pdf>

Sommer SG, Petersen SO, Møller HB (2004). Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69(2):143–154.
(<http://link.springer.com/article/10.1023/B%3AFRES.0000029678.25083.fa>).

Sommer SG, Petersen SO, Søgaard HT (2000). Greenhouse Gas Emission from Stored Livestock Slurry. *Journal of Environment Quality*, 29(3):744.
(<https://www.crops.org/publications/jeq/abstracts/29/3/JEQ0290030744>).

UNFCCC (2008). Tool to Calculate Project or Leakage CO2 Emissions from Fossil Fuel Combustion (Version 02). United Nations Framework Convention on Climate Change/Clean Development Mechanism (UNFCCC/CDM)
(<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-03-v2.pdf>).

UNFCCC (2012a). Project and leakage emissions from anaerobic digesters (Version 01.0.0). United Nations Framework Convention on Climate Change/Clean Development Mechanism (UNFCCC/CDM)
(<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-06-v2.0.pdf>).

UNFCCC (2012b). Project emissions from flaring (Version 02.0.0). United Nations Framework Convention on Climate Change/Clean Development Mechanism (UNFCCC/CDM) (<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-06-v2.0.pdf>).

US EPA (2006). *Other Test Method 10 (OTM 10) - Optical Remote Sensing for Emission Characterization from Non-Point Sources*. U. S. Environmental Protection Agency (Emission Measurement, Preliminary Methods);
<http://www.epa.gov/ttn/emc/prelim/otm10.pdf>).

US EPA (2010). *International Guidance for Quantifying and Reporting the Performance of Anaerobic Digestion Systems for Livestock Manures*. US Environmental Protection Agency (EPA), for The Methane to Markets Partnership
(https://www.globalmethane.org/documents/M2M_International_Guidance_for_AD_July2010.pdf).

US EPA (2011). *EPA Handbook: Optical remote sensing for measurement and monitoring of emissions flux*. Research Triangle Park, NC, US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards
(<http://www.epa.gov/ttn/emc/guidlnd/gd-052.pdf>).

US EPA (2014). OTM 33 - Geospatial Measurement of Air Pollution, Remote Emissions Quantification (GMAP-REQ) (Ver. 1.2). U. S. Environmental Protection Agency (<http://www.epa.gov/ttn/emc/prelim/otm33.pdf>).

VDI (2000). *VDI 4200 - Realization of stationary source emission measurements*. VDI Guideline, Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (http://www.vdi.eu/nc/guidelines/alt_vdi_4200-durchfuehrung_von_emissionsmessungen_an_gefuehrten_quellen/).

VDI (2010). *VDI Guideline 3475 Part 4: Emission control, Agricultural biogas facilities, Digestion of energy crops and manure*. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 79 s. (http://www.vdi.eu/nc/guidelines/vdi_3475_blatt_4-emissionsminde-rung_biogasanlagen_in_der_landwirtschaft_vergaerung_von_energiepflanzen_und/).

Westerkamp T et al. (2014a). *KlimaCH4 - Klimaeffekte von Biomethan*. Leipzig, Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ);:167 (https://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_20.pdf).

Westerkamp T, Reinelt T, Liebetrau J (2014b). Scientific measurements of methane emissions with remote and on-site methods in comparison. *2nd IBBA workshop on methane emissions*. Kiel, Germany (<http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/Westerkamp.pdf>).

Yoshida H, Mønster J, Scheutz C (2014). Plant-integrated measurement of greenhouse gas emissions from a municipal wastewater treatment plant. *Water Research*, 61:108–118. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414003595>).

9 Ordliste

BAT	Best available technology
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (tysk arbejdsmiljøinstitut)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz (tysk lov om udledning)
bLs	Backward Lagrangian stochastic
BREF	BAT Reference Document
BTEX	Benzen, toluen, ethylbenzen, xylener
CDM	Clean development mechanism
C ₂ H ₂	Acetylen
CH ₄	Metan
CO	Kulilte
CO ₂	Kultveilt
CO _{2e}	CO ₂ -ækvivalenter
CRDS	Cavity ring-down spectroscopy
DCA	Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet
DCE	Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet
DGC	Dansk Gasteknisk Center
DMS	Dimethylsulfid
DTU	Danmarks Tekniske Universitet
ECD	Electron capture detector
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz (tysk lov om vedvarende energi)
EU	Europæiske Union
EPA	Environmental Protection Agency, USA
FID	Flame Ionisation Detector
FN	Forende Nationer
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
H ₂ S	Hydrogensulfid
GC	Gaskromatograf
GHG	Greenhouse Gas - drivhusgas
GWP	Greenhouse warming potential
HC	Hydrocarbons (kulbrinte forbindelser)
IED	Industriel Emissionsdirektiv
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	Infrarød
LULUCF	Land-use, land-use change and forestry (

MMR	Monitoring mechanism regulation
N ₂ O	Lattergas
NH ₃	Ammoniak
NMVOG	Non-methane hydrocarbons (flygtige organiske forbindelser undtagen metan)
NO _x	blanding af nitrogenoxid (NO) og nitrogendioxid (NO ₂)
O ₂	Ilt
OTM	Other test method
ppb	parts per billion, (milliardtedel), pr. 10 ⁻⁹
PJ	Petajoule
PSA	Pressure swing adsorption
RPM	Radial plume mapping
RTO	Regenerative thermal oxidizer
SF ₆	Svovlhexafluorid
TDLAS	Tunable diode laser absorption spectroscopy
TOC	Total organic carbon (total organisk kulstof)
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile organic compounds (flygtige kulbrinte-forbindelser)
WT-BREF	Waste treatment BAT reference document