

2. marts 2016

Notat

Miljøvurdering af imødegåelse af metanemission fra affaldsdeponier ved implementering af hhv. biocover og gasopsamling med energiudnyttelse

Jacob Møller

Peter Kjeldsen

Charlotte Scheutz

DTU Miljø

Indholdsfortegnelse

Sammenfatning	4
1 Baggrund.....	7
2 Formål og omfang af LCA'en	9
2.1 Formål.....	9
2.2 Overordnede principper	9
2.3 Funktionel enhed.....	9
2.4 Systemgrænser	10
2.5 Miljøpåvirkningskategori og karakteriseringsmetode.....	10
2.6 LCA-modellen EASETECH	11
2.7 Datagrundlag og datakvalitet	11
2.8 Notatformat, målgrupper og kritisk gennemgang af resultater.....	11
2.9 Tidshorisont.....	12
3 Forudsætninger	13
3.1 Modellering af metanproduktion i affaldsdeponi	13
3.1.1 Deponiets udformning.....	14
3.1.2 Gasproduktion	14
3.2 Biocover.....	17
3.3 Gasopsamlingseffektivitet, energiudnyttelse og energisubstitution	18
3.3.1 Vurdering af nettoopsamlingseffektivitet	18
3.3.2 Status i Danmark for energiudnyttelse af deponigas	20
3.3.3 Dual-fuel deponigasmotorer	23
3.3.4 Modellering af energiudnyttelse af deponigas	24
3.3.5 Modellering af substitueret energiproduktion.....	26
4 Scenarier.....	27
5 Resultater	29
5.1 Den samlede potentielle drivhuseffekt i scenarierne	29
5.2 Potentiel drivhuseffekt i scenarierne fordelt på underprocesser	31

5.3	Potentiel drivhuseffekt forbundet med anvendelse af dual-fuel-motor	32
6	Konklusioner	34
7	Referencer	35

Sammenfatning

Der blev udført en livscyklusbaseret miljøvurdering af imødegåelse af metanemission fra danske affaldsdeponier. For enkeltheds skyld omfattedes kun potentielle miljøeffekter i drivhuseffektkategorien. Miljøvurderingen blev udformet som en scenarieundersøgelse, hvor der blev modelleret en række scenarier vha. LCA-modellen EASETECH, som repræsenterede to principielt forskellige metoder til imødegåelse af metanemission fra deponier, dvs. henholdsvis et biocover og gasopsamling med energiudnyttelse. For fuldstændighedens skyld blev der også opstillet et scenarie, hvor der ingen afværgeforanstaltninger fandt sted. Inden for de to metoder til imødegåelse af metanemission blev scenarierne modelleret med forskellige parameterverdier og rammebetingelser.

Livscyklusvurderingen blev udført som en konsekvens-LCA, hvor miljøkonsekvenser af at ændre systemet – i dette tilfælde implementering af biocover eller gasopsamling med energiudnyttelse på eksisterende danske affaldsdeponier – blev opgjort. Vigtigt for konsekvens-LCA er benyttelse af marginale procesdata, som især var af betydning ved modellering af den substituerede energiproduktion.

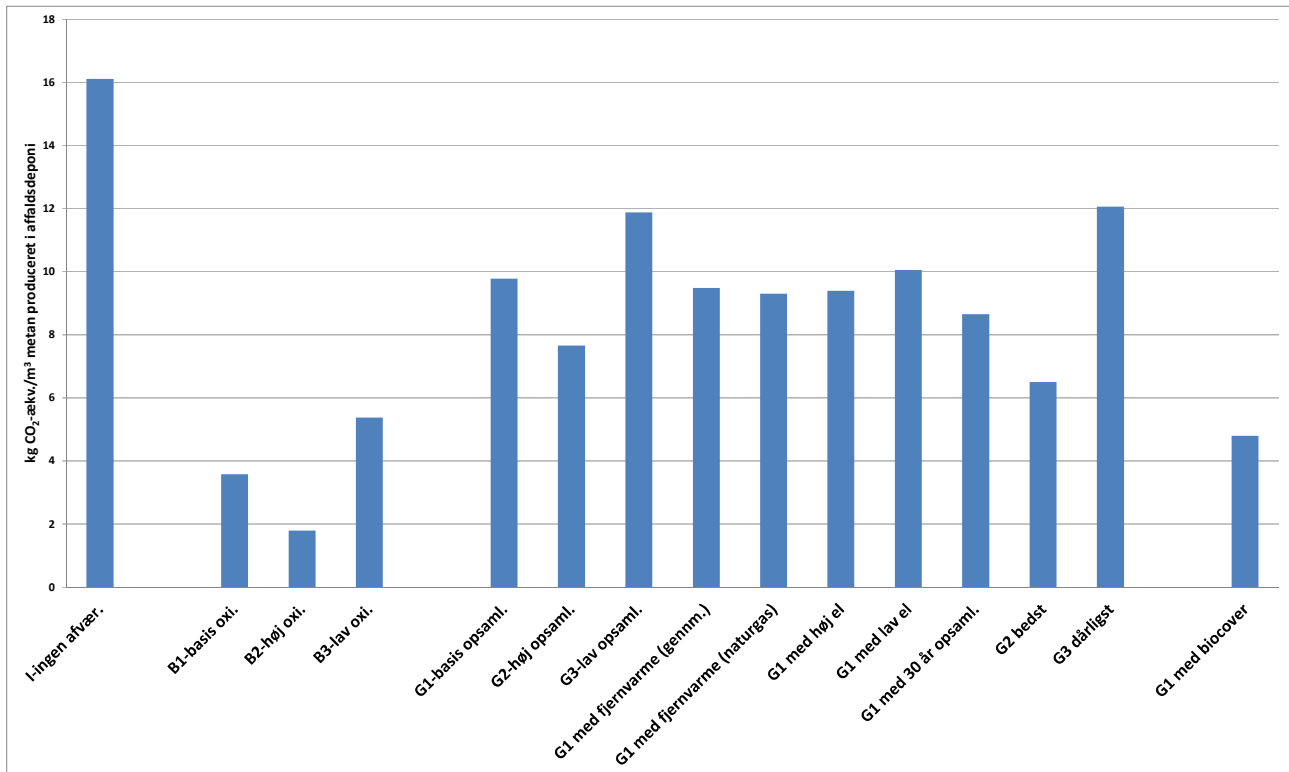
Den funktionelle enhed er den ydelse, som affaldssystemet skal levere i alle scenarier, for at de er sammenlignelige. Den defineredes som:

- Håndtering/behandling af 1 Nm³ metan produceret i perioden 2015 til 2115 i et generisk, dansk affaldsdeponi anlagt i 1985 (indeholdende en blanding af husholdningsaffald og erhvervsaffald inklusiv shredderaffald) og med den akkumulerede metanproduktion modelleret med affaldsdeponimodellen Afvalzorg.

Håndtering og behandling indbefatter i denne sammenhæng oxidationsprocesserne i biocover og afdækningslag samt gasopsamling og energiudnyttelse vha. gasmotor.

De vigtigste forudsætninger for at modellere behandling af den funktionelle enhed viste sig at være størrelsen af metanoxidationen i biocoveret og gasopsamlingseffektiviteten. Biocoverets metanoxidation er undersøgt på Klintholm Deponi, hvor gennemsnitsværdien var ca. 80 %, og på den baggrund blev det valgt at modellere biocoveret med 70, 80 og 90 % metanoxidationseffektivitet, med 80 % som basisværdi. Gasopsamling er ligeledes undersøgt på et antal danske deponier, som havde opsamlingseffektiviteter i intervallet 41 til 81 % af den producerede metan. Scenarier med gasopsamling blev derfor modelleret med mellem 40 og på 80 % gasopsamlingseffektivitet med 60 % som basisværdi. Opsamlingsperioden blev sat til 20 år fra 2015-2035; derefter formodedes den faldende gasproduktion at vanskeliggøre en rentabel gasopsamling. Biocoveret blev modelleret i hele 100-års-perioden fra 2015 til 2115.

Hovedresultaterne kan ses på nedenstående figur 0, som viser potentiel drivhuseffekt angivet som kg CO₂-ækvivalenter per Nm³ metan dannet i deponiet. Der er fire typer scenarier (15 scenarier i alt): ét scenarie uden afværgeforanstaltninger, tre scenarier med biocover med varierende oxidationseffektivitet, ti scenarier med gasopsamling og energiudnyttelse ligeledes med varierende parametre, og desuden et kombinationsscenario, hvor gasopsamling med basisparametre blev kombineret med efterfølgende anlæggelse af et biocover med basiseffektivitet.



Figur 0. Den samlede potentielle drivhuseffekt i 15 scenarier med varierende imødegåelse af metanemission fra et generisk, dansk affaldsdeponi.

Det ses umiddelbart af figuren, at alle behandlingsscenarier er miljømæssigt set bedre end scenariet uden afværgeforanstaltninger, idet de samlede emissioner er numerisk mindre end i dette scenarie. De tre scenarier B1, B2 og B3 repræsenterer biocover-metoden med hhv. 80, 90 og 70 % metanoxidationseffektivitet. De potentielle miljøeffekter er omvendt proportionale med oxidationseffektiviteten. Det ses, at biocover under disse forudsætninger er miljømæssigt bedre i drivhuseffektkategorien end samtlige scenarier med gasopsamling og energiudnyttelse. Ved kombination af gasopsamling med energiudnyttelse (med basisparametre) og efterfølgende anlægning af et biocover (scenarie "G1 med biocover") kan der opnås væsentlige forbedringer i forhold til de resterende gasopsamlingsscenarier, men denne løsning er stadig miljømæssigt mindre god end B1-scenariet (hvor biocoveret har samme oxidationseffektivitet).

For at få et mere detaljeret billede af årsagerne til forskelle mellem scenarierne fordeltes de potentielle miljøpåvirkninger på underprocesserne "Substitution af fjernvarme (naturgas)", "Substitution af elproduktion fra biogasmotor", "Metanemission gennem afdækningslag", "Emissioner fra biogasmotor" og "Substitution af fjernvarme (gennm.)". Der henvises til selve notatet for en detaljeret diskussion af disse resultater, men det kan nævnes, at "Metanemission gennem afdækningslag" var den altdominerende underproces i alle scenarier, som langt overskygger miljøbesparelserne i gasopsamlingsscenarierne ved energiproduktion og resulterende substitution af fossil energi.

Selv ved høj gasopsamling (80 %) var den potentielle drivhuseffekt, som skyldes metanemission gennem afdækningslaget, dominerende. Det skyldes, at der er tale om bruttoemission, dvs. at den kun er gældende i opsamlingsperioden på 20 år, hvorefter 90 % af metan produceret i den resterende periode ender direkte i atmosfæren. I alle gasopsamlingsscenarier tabes der 35,8 % af metan produceret i 100-års-perioden i perioder uden opsamling, dvs. fra 2035-2115. Desuden tabes der metan i opsamlingsperioden, da opsamlingseffektiviteten højst udgør 80 %.

Ud fra disse resultater kan følgende overordnede konklusioner angående biocover-metoden og gasopsamling med energiudnyttelse drages:

- Både biocover og gasopsamling leder i alle scenarier til en væsentlig potentiel miljøforbedring i forhold til ingen afværgeforanstaltninger.
- Ved en effektivitet af biocover på 70 til 90 % leder alle biocoverscenarier til mindre potentielle miljøbelastninger end gasopsamlingsscenarierne.
- Hvis biocover har 80 % effektivitet i hele 100-års-perioden, kan det ikke overgås af et kombinationsscenario, hvor gasopsamling med basisparametre (60 % bruttogasopsamlingseffektivitet, og 27.8 % el-effektivitet) kombineres med efterfølgende anlæggelse af et biocover med 80 % effektivitet.
- Metanemission gennem afdækningslaget er den dominerende underproces i alle scenarier, også i gasopsamlingsscenarier.
- Opsamlingsscenarierne udviser miljøbesparelser fra substitution af el og varme, men det kan ikke opveje miljøbelastningerne ved metanemission gennem afdækningslaget.

Under de givne basisforudsætninger er biocover miljømæssigt mere hensigtsmæssigt end gasopsamling. Dette skyldes hovedsageligt, at metanemissionen gennem afdækningslaget i og efter gasopsamlingsperioden spiller en afgørende rolle for gasopsamlingsscenarierne.

1 Baggrund

Den danske regering indførte i 1997 et forbud imod deponering af forbrændingsegnet affald på danske affaldsdeponier. Dette medførte, at deponierne modtog væsentligt mindre mængder organisk affald, hvilket har resulteret i dannelse af mindre mængder af drivhusgassen metan. Dannelsen af metan forløber dog over flere dekader efter at affaldet er blevet deponeret. Dette betyder, at der på ældre danske deponietaper stadig dannes betydelige mængder metan, som på mange af deponierne bliver emitteret direkte til atmosfæren. Som alternativ til opsamling af deponigassen kan gasemissionen imødegås ved etablering af et biocoversystem, hvor metanen mikrobielt omdannes til kuldioxid med en signifikant reduktion i emissionen af drivhusgasser fra deponiet til følge.

Hvor biocoversystemer alene leder til en imødegåelse af metanemissionen, kan gasindvindingsanlæg udover en imødegåelse også give en energiudnyttelse i form af el og varme, som kan substituere anden energi, f.eks. i form af fossile brændstoffer. Etablering af gasudnyttelsesanlæg er dog oftest dyrere sammenlignet med etablering af biocoversystemer. Samtidig er der meget lidt viden om, hvor effektive gasudnyttelsesanlæg er som imødegåelsestiltag – med andre ord, hvor stor en andel af den genererede metan som opsamles via gasindvindingsanlægget. Ved etablering af gasopsamlingsanlæg på ældre deponier med aftagende gasproduktion kan det være en udfordring at opsamle gassen med en kvalitet (et højt metanindhold), som gør at gassen kan affakles eller energiudnyttes ved afbrænding i en gasmotor. I sådanne tilfælde kan det være nødvendigt at tilføre støttebrændsel enten i form af propangas ved affakling eller i form af diesel ved afbrænding i en gasmotor. Ofte vil det også være nødvendigt at slukke for anlægget i perioder med henblik på at lade gassen ophobe sig i deponiet. Efterfølgende kan anlægget genstartes, og den ophobede gas kan opsamles.

Både etablering af et biocover og gasopsamling med energiudnyttelse kan således bidrage til at imødegå metanemission fra affaldsdeponier, men en sammenligning af de miljømæssige konsekvenser ved de to metoder er ikke foretaget tidligere. Miljøstyrelsen har derfor ønsket en livscyklusbaseret miljøvurdering (LCA) af de to omtalte metoder til at nedbringe potentielle miljøbelastninger ved metanemission fra danske affaldsdeponier.

Dette notat udgør en indledende behandling af emnet, der er forsøgt gjort så simpelt som muligt for at lette fortolkningen af resultaterne. Der er bl.a. gjort en del for at forenkle modelleringen af emissioner og energieffektivitet ved energiudnyttelse af biogassen, som udviser et stort spænd mht. hvilke gasmotorer, kedler, eller sågar gasturbiner, der benyttes til energiudnyttelse af deponigas i Danmark (se afsnit 3.3.2). Dette indebærer bl.a., at det tidsmæssige perspektiv, som skyldes en faldende metanproduktion over tid i affaldsdeponier, beskrives vha. en nettoeffektivitet for gasopsamlingen (se afsnit 3.3.1). På samme måde fokuseres der udelukkende på brug af gasmotorer til energiudnyttelse, hvor det desuden er valgt at modellere motoren med brug af støttebrændsel (dual-fuel).

En yderligere forsimpning opnås ved, kun at betragte potentielle miljøeffekter i drivhuseffektkategorien, idet metans miljøeffekter er koncentreret i denne miljøpåvirkningskategori (metan har desuden en sideeffekt idet metan bidrager til fotokemisk smogdannelse). Den direkte effekt af at nedbringe metanemission fra affaldsdeponier vil derfor være et fald i potentiel drivhuseffekt, men da gasopsamlingsteknologien også inkluderer energiudnyttelse, vil der opstå sekundære effekter ved forbrænding af metan og diesel og resulterende substitution af fossile brændsler. Emissioner (ud over CO₂)

fra forbrænding i dual-fuel-gasmotorer er ikke velbeskrevne og sandsynligvis specifikke for motormodel og fabrikat. På lignende måde vil undgåede emissioner (udover CO₂) ved substitution af fossile brændsler være teknologispecifikke og afhængige af fremtidige krav til røggasrensning og behandling af restprodukter. Som konsekvens heraf vil potentielle miljøpåvirkninger ud over drivhuseffekt være behæftet med stor usikkerhed, og det er derfor valgt at fokusere på de potentielle direkte og sekundære miljøpåvirkninger i miljøpåvirkningskategorien "drivhuseffekt".

2 Formål og omfang af LCA'en

I afsnit 2.1 til 2.9 beskrives formål og omfang af miljøvurderingen. De beskrevne forhold repræsenterer de vigtigste af de generelle forudsætninger for LCA'en, som skal angives ifølge ISO-standard 14044. De specifikke forudsætninger, som bl.a. knytter sig til modellering af metanemission fra et generisk, dansk deponi samt effektivitet af biocover og gasopsamling findes nedenfor i kapitel 3.

2.1 Formål

Formålet med denne livscyklusbaserede miljøvurdering (LCA) er at vurdere potentielle miljøkonsekvenser i miljøpåvirkningskategorien "drivhuseffekt" ved imødegåelse af metanemission fra affaldsdeponier ved implementering af hhv. biocover og gasopsamling med energiudnyttelse.

2.2 Overordnede principper

Det overordnede princip bag en livscyklusvurdering er, at man tænker hele affaldsbehandlings livscyklus ind i opgørelsen af potentielle miljøpåvirkninger. På den måde kan de væsentligste stadier i processen identificeres. Det viser sig ofte ved livscyklusvurderinger af affaldssystemer, at væsentlige miljøpåvirkninger ligger uden for de egentlige behandlingsanlæg – i sådanne tilfælde er det afgørende at benytte livscyklustilgangen for at kunne sammenligne behandlingsmetoder på en rimelig måde.

Livscyklusvurderingen blev udført som en såkaldt konsekvens-LCA, hvor miljøkonsekvenser af at ændre systemet – i dette tilfælde implementering af biocover eller gasopsamling med energiudnyttelse på eksisterende danske affaldsdeponier – blev opgjort. Vigtigt for konsekvens-LCA er benyttelse af marginale procesdata, dvs. data for de processer, som reelt påvirkes af systemet i stedet for gennemsnitsværdier. I dette projekt har det især betydning ved energiudnyttelse af den opsamlede metan fra deponiet, som forudsættes at substituere marginal el og varme, som for elproduktionens vedkommende er væsentligt forskellig fra gennemsnitlig dansk elproduktion. Der er derfor i nærværende projekt benyttet marginale procesdata, hvor det har været muligt.

2.3 Funktionel enhed

Den funktionelle enhed er den ydelse, som affaldssystemet skal levere i alle scenarier, for at de er sammenlignelige. Den defineres som:

- Håndtering/behandling af 1 Nm³ metan produceret i perioden 2015 til 2115 i et generisk, dansk affaldsdeponi anlagt i 1985 (indeholdende en blanding af husholdningsaffald og erhvervsaffald inklusiv shredderaffald) og med den akkumulerede metanproduktion modelleret med affaldsdeponimodellen Afvalzorg (Scharff og Jacobs, 2006).

Håndtering og behandling indbefatter i denne sammenhæng oxidationsprocesserne i biocover og afdækningslag samt gasopsamling og energiudnyttelse vha. gasmotor.

Det er valgt at benytte håndtering af 1 Nm³ metan produceret i affaldsdeponiet som funktionel enhed. Dette er gjort for at gøre beregninger og resultater mere overskuelige. Det understreges dog, at de beregnede miljøeffekter per m³ metan kan omregnes til miljøeffekter per ton deponeret affald vha. den omtalte affaldsdeponimodel (se afsnit 3.1.2). Resultaterne er desuden skalérbare, idet den tidsafhængige gasproduktion af 1 Nm³ metan, dvs. gasproduktionen år for år i 100-års-perioden, antages at være

det antages, at de karakteriserede værdier for potentiel drivhuseffekt angivet i kg CO₂-ækvivalenter repræsenterer en tilstrækkelig velkendt enhed.

2.6 LCA-modellen EASETECH

Livscyklus-modelleringen er gennemført med modellen EASETECH (Clavreul et al., 2014), der er udviklet ved Danmarks Tekniske Universitet. Med udgangspunkt i en detaljeret kemisk sammensætning af materialefraktioner i affaldet, beregnes vha. EASETECH masse-flow, ressourceforbrug og emissioner fra affaldssystemer, som defineres af brugeren. EASETECH omfatter kildesortering, indsamling og transport af affald, materialeopbevaringsfaciliteter, forbrændingsanlæg, komposteringsanlæg, biogasanlæg, kombinerede biogas- og komposteringsanlæg, deponeringsanlæg, anvendelse af organisk affald i jordbruget, genanvendelse af materialer, energiudnyttelse samt materialeudnyttelse.

Modellen indeholder data for udvalgte anlæg og processer, men tillader også, at specifikke anlæg opstilles og gemmes i modellen. Scenarier med flere strenge kan opstilles for et givet system, startende med affaldsgenereringen og afsluttende med slutdisponeringen i et deponi; herimellem kan der modelleres industriel materialegenanvendelse, udspreddning på landbrugsjord, udnyttelse i energianlæg eller materialeudnyttelse. Hvor der sker materialegenanvendelse, energiudnyttelse eller materialeudnyttelse, krediteres affaldssystemet for de ressourcemæssige og miljømæssige besparelser, der opnås ved, at den tilsvarende produktion baseret på jomfruelige materialer undgås. EASETECH indeholder databaser for en række centrale processer, f.eks. for transport, elektricitets- og varmfremstilling. Herudover kan data importeres fra kommercielle databaser.

2.7 Datagrundlag og datakvalitet

Miljøvurderingen bygger overvejende på generiske data, som beskriver den tidsafhængige metanproduktion i et generisk, dansk affaldsdeponi vha. modellering med deponigasmodellen Afvalzorg (Scharff og Jacobs, 2006, Scheutz og Kjeldsen, 2010). Denne model er state-of-the-art og er benyttet i en række videnskabelige artikler om gasemission fra affaldsdeponier, f.eks. Mou et al. (2015), Scheutz et al. (2011), Scheutz et al. (2007) og Scharff og Jacobs (2006). Emission fra affaldsdeponier forsynet med biocover bygger på direkte målte værdier fra bl.a. Klintholm Deponi. Estimering af opsamlings effektivitet bygger hovedsageligt på videnskabelig litteratur. Med hensyn til de resterende energirelaterede teknologier, som benyttes til modellering, er der trukket på EASETECH's database, som indeholder en lang række processer til behandling af organisk affald, men også indeholder såkaldte "eksterne" processer, som bl.a. beskriver emissioner ved forbrænding af metan og dieselolie. Det vurderes derfor, at datakvaliteten er god, når det tages i betragtning, at der ikke er tale om modellering af et eksisterende system, men om modellering af en eventuel fremtidig implementering af de to teknologier.

2.8 Notatformat, målgrupper og kritisk gennemgang af resultater

Notatet beskriver en sammenlignende livscyklusvurdering. Notatet følger så vidt muligt principperne i ISO 14040 standarderne, uden dog at være udført i overensstemmelse med standarden i rigoristisk forstand. Rapportens målgruppe er i første omgang Miljøstyrelsen, som er opdrags- og bevillingsgiver.

Der er ikke foretaget en kritisk gennemgang/reviewproces af en uafhængig LCA-ekspert i forbindelse med udarbejdelse af dette notat, men repræsentanter fra Miljøstyrelsen har fået forelagt rapporten og har haft mulighed for at komme med kommentarer.

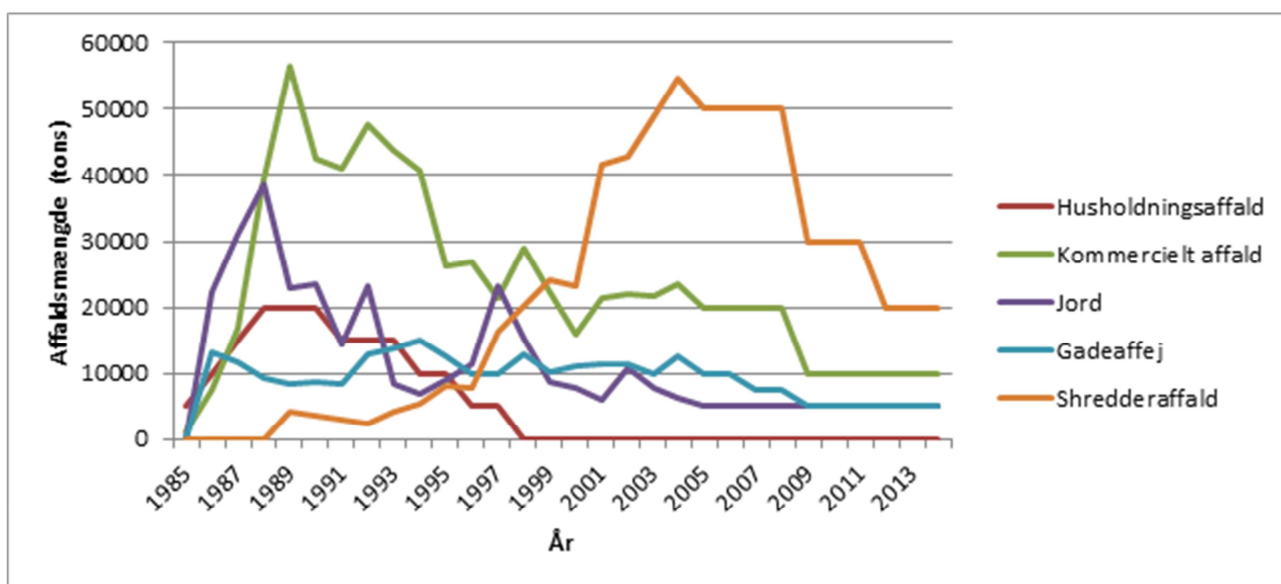
2.9 Tidshorisont

Den benyttede LCA-metode integrerer samtlige miljøpåvirkninger inklusiv drivhuseffekt over de første 100 år; dette er den tidsperiode, som miljøvurderinger af affaldssystemer normalt dækker (Gentil et al., 2010). Dette skyldes til stor grad, at emissioner af bl.a. drivhusgasser kan ske over en længere periode i affaldssystemer, som inkluderer deponier og/eller udnyttelse af kompost (og andre organiske restprodukter) på landbrugsjord. Således vil deponering af organisk affald eller udbringning af kompost ikke resultere i, at alle potentielle miljøpåvirkninger sker umiddelbart. Afhængigt af deponiets udformning og kompostens nedbrydelighed, vil emissionerne udstrækkes over en længere tidsperiode. Valg af 100 år som relevant tidsramme kan tilskrives erfaringer, som viser, at den overvejende del af drivhusgasemissioner fra affaldssystemer sker inden for denne periode. Det er dog vigtigt at understrege, at denne tidsramme ikke har nogen forbindelse til den LCI-mæssige estimering af GWP (Global Warming Potential), som typisk angives som GWP_{100} .

3.1.1 Deponiets udformning

Modellering af metanproduktionen tager udgangspunkt i et generisk deponi med en deponeringsperiode, affaldssammensætning og et gasproduktionsforløb, der er relevant for danske forhold. Deponiets areal, mængden af deponeret affald og således også gasproduktionen er større end de fleste deponier i Danmark, men resultaterne kan – takket være den funktionelle enhed, beskrevet i afsnit 2.3 – skaleres til mindre deponier, ud fra deres deponerede affaldsmængder.

Det generiske deponeringsanlæg har et areal på 30 ha, en deponeringskapacitet på 2,2 millioner m³ og har modtaget affald siden 1985. Den samlede mængde deponeret affald over perioden 1985 til 2015 er 2.160.000 ton. Det deponerede affald indeholder blandet husholdningsaffald (165.000 ton), kommercielt affald (707.000 tons), gadeaffej (280.000 ton), shredderaffald (660.000 ton) og jord (350.000 ton). Sammensætningen af det modtagne affald har ændret sig over perioden, således at husholdningsaffaldet primært modtoges i starten af deponeringsperioden og sidenhen er udfaset. Andelen af inert affald samt shredderaffald er derimod steget. Figur 3 viser fordelingen af affaldstyper, der er tilgået deponiet i perioden 1985 til 2015.



Figur 3. Affaldsmængder over deponeringsperioden fra 1985 til 2015.

3.1.2 Gasproduktion

Gasproduktionsmodellen er en Hollandsk model (Afvalzorg), som også er en af de muligheder (Tier 2), der kan anvendes ved den danske indrapportering af gasemissioner fra deponier til PRTR (Scheutz og Kjeldsen, 2010). Modellen har tidligere vist sig at være den model, der bedst modellerede metanemissioner fra danske deponier (Mou et al., 2015, Scheutz et al., 2011, Scheutz et al., 2007, Scharff og Jacobs, 2006). Dette skyldes, at modellen håndterer affaldsfraktioner af en mere inert karakter, i modsætning til de fleste andre modeller (eksempelvis Gassim, LandGem og IPCC), som er udviklet med henblik på deponier, hvor der primært deponeres husholdningsaffald med et højt indhold af organisk stof. Ved brug af de nævnte gasproduktionsmodeller vil gasproduktionen overestimeres. Holland har ligesom Danmark været et foregangsland i EU i forhold til udfasning af organisk affald fra deponering. De hollandske og danske

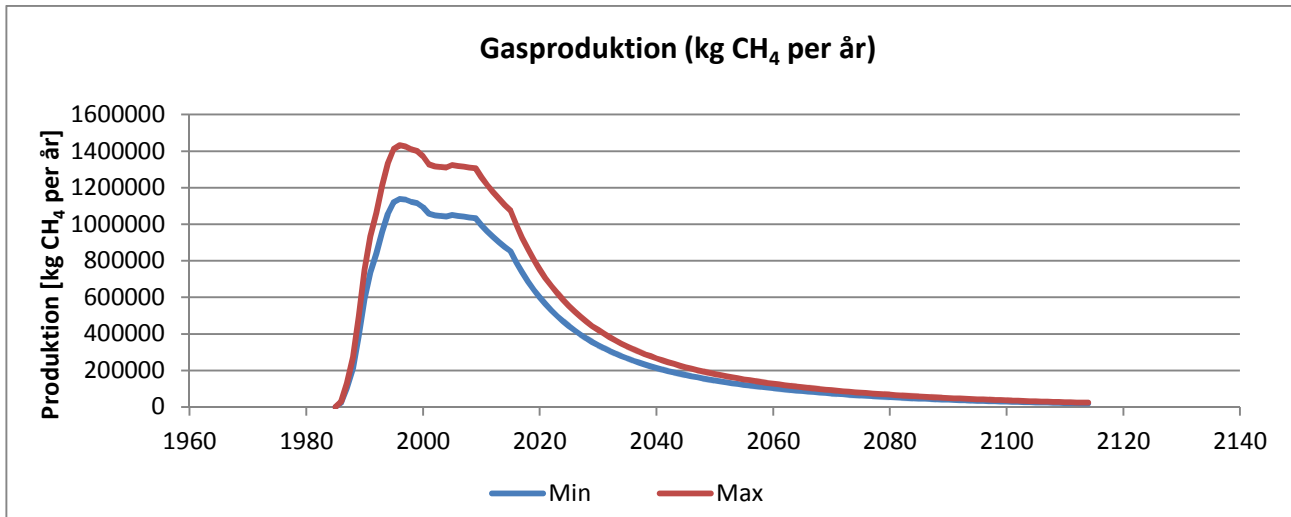
deponier har de sidste 10-15 år primært modtaget ikke-brændbart affald med et lavt indhold af organisk stof. Affaldskarakteristika for de forskellige affaldsfraktioner anvendt i Afvalzorg modellen er vist i Tabel 1.

Afvalzorg-gasproduktionsmodellen er udviklet af det hollandske affaldsselskab Afvalzorg. Modellen er beskrevet i detaljer i Scheutz og Kjeldsen (2010). Modellen beregner gasproduktionen på baggrund af deponerede affaldsmængder og affaldskategorier samt viden om, hvornår affaldet er deponeret. Modellen beskriver nedbrydningen af det deponerede affald ved hjælp en første ordens kinetik, hvilket betyder, at det antages, at mængden af gas dannet fra en mængde affald aftager eksponentielt over tiden som følge af, at det organiske indhold i affaldet omsættes. Modellen beregner gasproduktionen på baggrund af indholdet af organisk kulstof i affaldet. Indholdet af kulstof varierer imellem forskellige affaldskategorier. Samtidig vil ikke alt organisk kulstof nedbrydes lige hurtigt. Afvalzorg-modellen er en multifase-komponent-model, der opererer med 11 affaldskategorier og med tre niveauer af bionedbrydelighed (hurtig, moderat og langsom). Indholdet af organisk kulstof fordelt efter bionedbrydelighed for de fem affaldskategorier, der er deponeret i det generiske deponi, er vist i tabel 1.

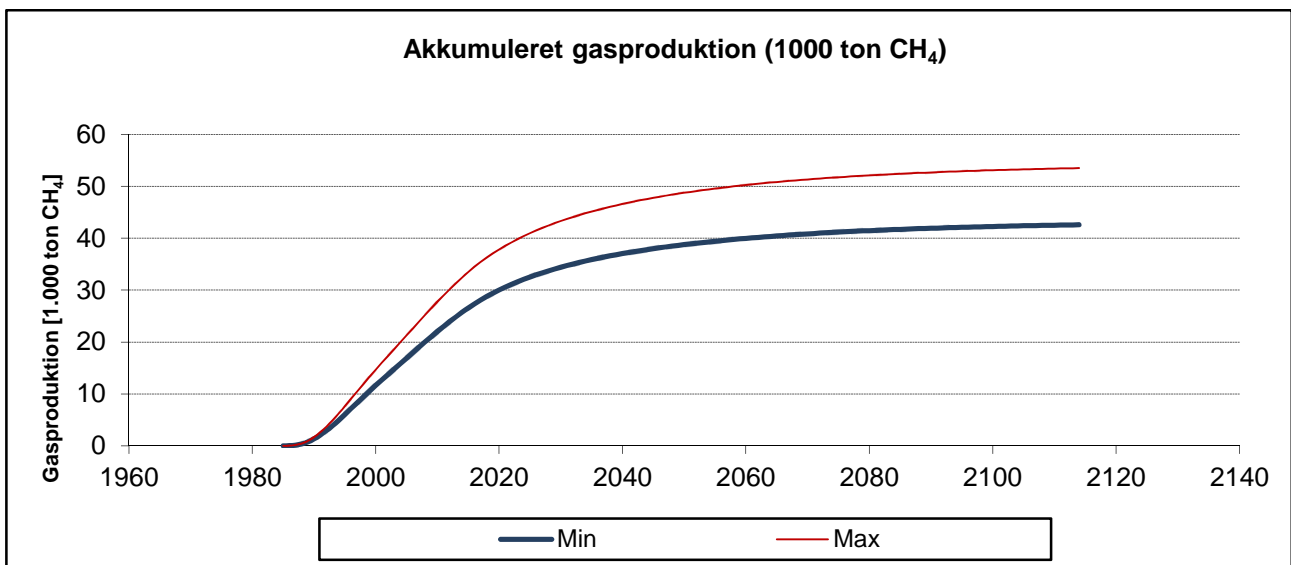
Tabel 1. Organisk kulstof-indhold i forskellige affaldskategorier anvendt i Afvalzorg-modellen. Følgende k-værdier for omsætningen af de tre organiske kulstoffraktioner er anvendt: 0,187 (hurtig), 0,099 (moderat) og 0,03 (langsom).

Affaldskategori	Andelen af organisk kulstof fordelt i fire kategorier efter nedbrydelighed (%)				Andelen af organisk kulstof fordelt i fire kategorier efter nedbrydelighed (%)				Organisk kulstof (kg per ton vådvægt)	
	MIN				MAX				MIN	MAX
	Hurtig	Moderat	Langsom	Inert	Hurtig	Moderat	Langsom	Inert		
Husholdningsaffald	18	33	18	31	22	37	22	19	134	146
Kommercielt affald	5	30	30	35	7	30	30	33	120	140
Jord	0	4	14	82	0	6	18	76	17	19
Gadeaffej	10	20	30	40	12	22	40	26	66	74
Shredderaffald	0	10	30	60	0	15	35	50	38	42

Modellen beregner den årlige og den akkumulerede gasproduktion angivet i enten m³ metangas eller i kg metan. Modellen genererer en maksimum og en minimum gasproduktion. Figur 4 viser den årlige gasproduktion (kg CH₄ per år) fra 1985 og frem til 2115 fra det generiske deponi. Det ses, at gasproduktionen toppede i 1997 (1411 tons CH₄ per år, max) og derefter aftager svagt frem til 2009 (1040 tons CH₄ per år, min). Gasproduktionen er i år 2015 på ca. 850 tons CH₄ per år (max) og vil derefter aftage kraftigt, da der derefter ikke længere deponeres affald i deponiet. Figur 5 viser den akkumulerede gasproduktion (1.000 ton CH₄) for samme periode. Det ses af figuren, at i 2115 vil den samlede producerede gasmængde være mellem 42,6 (min) og 53,5 (max) x 1.000 ton CH₄. På baggrund af den akkumulerede gasproduktion kan andelen af den samlede gasproduktion produceret til ethvert tidspunkt beregnes. I 2014 vil (29,1/48,1=) 60 % af den samlede gasproduktion være sket, mens det i 2035 vil være (40,5/48,1=) 84 %, baseret på gennemsnit af min og max produktion i de respektive år.



Figur 4. Gasproduktion (kg CH₄ per år) fra 1985 til 2115. I perioden 1985 til 2115 modtager deponiet affald, hvorefter det antages at deponiet nedlukkes. Gasproduktionen vil herefter aftage.



Figur 5. Den akkumulerede gasproduktion (1.000 ton CH₄) fra 1985 til 2115. I perioden 1985 til 2015 modtager deponiet affald, hvorefter det antages, at deponiet nedlukkes.

Gasproduktionen er som nævnt beregnet ud fra de årlige deponerede affaldsmængder og sammensætning (jævnfør figur 3). Gasproduktionen er dermed skalérbar med den deponerede affaldsmængde under antagelse af, at affaldet har samme sammensætning og er deponeret på samme vis som i det generiske deponi. Gasproduktionen er ikke skalérbar med deponiets areal, da dette ikke indgår i gasproduktionsmodellen. Det er således ikke af betydning for gasproduktionens størrelse, hvad deponiets fyldhøjde er – men udelukkende hvor meget affald, der ligger i deponiet.

Den funktionelle enhed kan dermed relateres til en specifik mængde affald, således at de potentielle miljøpåvirkninger kan beregnes, hvis mængden af deponeret affald er kendt. Iflg. afsnit 3.1.1 og figur 5 og tabel 2 i afsnit 3.1.2 er forudsætningerne for modellering af gasproduktionen, at 2.160.000 ton affald har

produceret 19.000 ton metan i perioden 2015-2115, hvilket giver 8,8 kg metan/ton affald svarende til 12,3 Nm³ metan/ton affald. De rapporterede resultater kan derved omregnes per ton affald ved at multiplicere med 12,3. Det understreges, at denne omregning kun gælder under de i afsnit 3.1 beskrevne forudsætninger om affaldssammensætning, tidsmæssig deponering af forskellige affaldsfraktioner, nedbrydelighed etc.

3.2 Biocover

Ved anlæggelse af et biocover på et eksisterende deponi nedbringes emissionen af metan produceret i deponiet ved mikrobiel oxidation. Biocoveret skal således bestå af et biologisk aktivt materiale. Kompost af have-/parkaffald og kompost af kildesorteret organisk dagrenovation, eller blandinger heraf, har vist sig effektive – med høj kapacitet for metanoxidation – som beskrevet af Scheutz et al. (2014).

Direkte målinger af et biocovers effektivitet til at nedbringe metanemission fra deponier er få, men er beskrevet i detaljer i Scheutz et al. (2014), som omhandler fuldskalaforsøg med implementering af et biocover samt direkte målinger af metanoxidationen på Klintholm Deponi. Forsøgene viste en reduktion af metanemissionen gennem afdækningslaget på mellem 76 og 89 % i forskellige forsøgsrækker ved implementering af et biocover bestående af et 70 cm tykt lag kompost. Scheutz et al. (2014) konkluderer, at 80 % oxidation kan benyttes til at repræsentere den gennemsnitlige oxidationseffektivitet, men det er ligeledes klart, at mere eller mindre effektiv oxidation kan tænkes at forekomme. Disse resultater ligger til grund for modellering af biocover i basisscenariet, hvor metanoxidationen således sættes til 80 % af det producerede metan i deponiet. Som resultaterne fra Klintholm Deponi viser, er hhv. 90 og 70 % metanoxidation i biocoveret også realistiske værdier, som følgelig blev benyttet i to andre scenarier.

Ved modellering af biocoveret blev der anvendt to yderligere forudsætninger, idet det antoges, at biocovermaterialet udelukkende bestod af have-/parkkompost samt at komposten skulle udskiftes hvert femte år for at opretholde maksimal oxideringseffektivitet. Klintholm-undersøgelsen viste, at have-/parkaffaldskompost er velegnet til at indgå som biocovermateriale. Fra et LCA-teknisk synspunkt er have-/parkkompost enklere at modellere, da det ved alternativ anvendelse, f.eks. som udbringning på landbrugsjord, ikke erstatter andre produkter, som handelsgødning. Det er således ikke nødvendigt at modellere potentielle miljøpåvirkninger ved alternativ anvendelse af have-/parkkompost. Mht. udskiftningsfrekvensen af komposten, for at sikre maksimal oxidation, er der tale om et skøn, da der ikke foreligger eksperimentelle data for dette forhold. Det antages, at effektiviteten (den procentuelle omsætning af metan i biocoveret) vil kunne opretholdes over deponiets levetid, da komposten løbende udskiftes, men også fordi gasproduktionen i deponiet vil aftage med tiden, og metanbelastningen til biocoveret (målt som metan tilført per arealenhed af biocoveret per tidsenhed) dermed også vil aftage. Når metanbelastningen til biocoveret aftager, vil gassens opholdstid i biocoveret stige, hvorved den procentuelle omsætning forventes at stige. Her antages dog, at effektiviteten blot forbliver konstant.

3.3 Gasopsamlingseffektivitet, energiudnyttelse og energisubstitution

I afsnit 3.3 beskrives forudsætningerne for modellering af gasopsamling og energiudnyttelse på affaldsdeponier. Dette inkluderer rationale for størrelsen af de valgte af opsamlingseffektiviteter samt en beskrivelse af beregning af nettoopsamlingseffektiviteter. Derefter følger en gennemgang af foreliggende data om gasopsamling på affaldsdeponier i Danmark, som danner grundlag for valg af værdier for el- og varmeeffektivitet for biogasmotorer. Ydermere beskrives det spinkle datagrundlag for modellering af dual-fuel-motorer. Afsnittet afsluttes med en sammenfatning af de benyttede parametre samt en beskrivelse af den substituerede energi.

3.3.1 Vurdering af nettoopsamlingseffektivitet

Data om gasopsamlingseffektivitet på affaldsdeponier, som baserer sig på egentlige målinger, er sparsomme. I en artikel (Barlaz et al., 2015) om gasopsamlingseffektivitet på affaldsdeponier, som indeholder et litteratur-review, rapporteres opnåelige opsamlingseffektiviteter på mellem 55 og 100 %. Den sidste værdi er opnået i et bioreaktorsystem, som ikke er relevant i denne sammenhæng. Mønster et al. (2015) er dog en helt ny undersøgelse, som rapporterer in-situ gasemissionsmålinger fra 15 deponier – heraf seks forsynet med gasopsamling. Gasopsamlingseffektiviteterne blev estimeret til at ligge mellem 41 og 81 % af den producerede deponigas.

På denne baggrund valgtes at betragte opsamlingseffektiviteter i intervallet 40-80 %. Det skal understreges, at de relativt høje opsamlingsværdier rapporteret af Barlaz et al. (2015) i de fleste tilfælde henviser til deponier i den tidlige gasproduktionsfase. I de danske tilfælde, hvor det drejer sig om ældre deponier med lavere gasproduktion, er det tvivlsomt, om så høje effektiviteter kan opnås. Målingerne udført af Mønster et al. (2015) viste, at de fleste deponier med gasopsamling havde en noget lavere gasopsamlings-effektivitet, og det er derfor i denne rapport valgt at benytte 60 % bruttoopsamling som basisværdi og en maksimumsværdi på 80 % under optimale forhold, som kan tænkes at falde til 40 % under suboptimale forhold, der kan skyldes svingende gasproduktion eller nedetid for gasmotor eller opsamlingsystem.

Effektiviteten af biocover og gasopsamling vurderes således i 100-års-perioden fra 2015 til 2115. For biocover-løsningen antages oxidationseffektiviteten at udgøre en fast procentdel af den producerede metan, hvorimod det i forbindelse med implementering af gasopsamling kun er en del af 100-års-perioden, som dækkes af denne. Det er i dette notat antaget, at gasopsamlingsperioden strækker sig over 20 år fra 2015 til 2035, hvorefter gasproduktionen i deponiet aftager så meget, at en rentabel gasopsamling vil være vanskelig at opretholde. Gasopsamlingseffektiviteten (som procent af produceret metan) i opsamlingsperioden, som i nærværende projekt kaldes bruttoopsamlingseffektiviteten, estimeres til mellem 40 og 80 %, men der skal også tages højde for emissionen i perioden uden gasopsamling. Nettoopsamlingseffektiviteten over hele 100-års-perioden defineres derfor som bruttoopsamlingseffektiviteten multipliceret med mængden af metan produceret i opsamlingsperioden divideret med den samlede metanproduktion i 100-års-perioden.

Følgende eksempel illustrerer beregningen: Hvis opsamlingseffektiviteten i opsamlingsperioden er 60 % (bruttoopsamlingseffektivitet), og der produceres 11,4 enheder metan i denne periode ud af en samlet metanproduktion i 100-års-perioden på 19,0 enheder, er nettoopsamlingseffektiviteten $(60 \% \times 11,4) / 19,0 = 36 \%$. Den mængde metan, som ikke bliver opsamlet, udgør således 64 % af metanen, som blev produceret i deponiet i 100-års-perioden. Herfra skal dog trækkes oxidationen i afdækningslaget, som i hele

100-års-perioden antages at være 10 %, som siden 1997 har været en standardværdi ifølge IPPC, nettoemissionen udgør derfor 57,6 %.

Den opsamlede metan benyttes til energiformål og substituerer dermed delvist energi baseret på fossile brændsler. Det forudsættes, at den fossile brændselsammensætning ændres i løbet af opsamlingsperioden, og for at kunne beregne substitutionsværdien er det derfor nødvendigt at kende mængderne af metan, som opsamles i de forskellige tidsintervaller. På baggrund af modelleringen af gasproduktionen, som vist i Figur 5, kan den akkumulerede metanproduktion i forskellige tidsintervaller estimeres. Minimum og maksimumværdier samt gennemsnittet heraf for den akkumulerede metanproduktion ses i Tabel 2.

Tabel 2. Akkumuleret metanproduktion fra et generisk, dansk affaldsdeponi anlagt i 1985, modelleret med Afvalzorg-modellen.

Periode	Akkumuleret gasproduktion (1000 ton CH ₄)		
	Min.	Max.	Gennemsnit
1985-2014	25,7	32,4	29,1
1985-2020	30,0	37,8	33,9
1985-2035	35,9	45,1	40,5
1985-2045	38,0	47,8	42,9
1985-2114	42,6	53,5	48,1

Ud fra gennemsnitsværdierne i tredje kolonne i Tabel 2 beregnes metanproduktionen i tidsintervallerne 2015-2020, 2021-2035, 2036-2045 og 2046-2115 som vist i Tabel 3. Denne tabel indeholder nettoopsamlingseffektiviteter og nettoemissioner ved forskellige bruttoopsamlingseffektiviteter, således at der kan gøres rede for de mængder metan som opsamles hhv. til energiformål og de mængder, som belaster miljøet ved emission til atmosfæren. Værdierne for nettometanopsamlingseffektiviteter findes ved multiplikation af bruttoopsamlingseffektiviteterne med metanproduktionen i det ønskede tidsinterval. Således beregnes nettoopsamlingseffektiviteten ved en bruttoopsamlingseffektivitet på 60 % i perioden 2015-2020 som 60 % af 25,6 % = 15,4 % af den samlede metanproduktion i hele perioden 2015-2115. Nettometanemissionerne beregnes på tilsvarende måde, idet der dog tages hensyn til, at afdækningslaget oxiderer 10 % af metanen. Nettometanemissionen ved en bruttoemission på 40 % beregnes til 40 % af 25,6 % = 10,4 % minus 10 % oxidation i afdækningslaget = 9,2 %. Den potentielle drivhuseffekt for den funktionelle enhed findes derefter ved at multiplicere med karakteriseringsfaktoren for metan. På tilsvarende måde findes den potentielle drivhuseffekt ved energiudnyttelse ved at multiplicere nettoopsamlingseffektiviteten med substitutionsfaktoren.

Tabel 3. Nettometanopsamlings effektivitet (%) og nettometanemission (%) i forskellige tidsintervaller og for forskellige bruttometanopsamlings effektiviteter. Nettoværdier beregnes i forhold til den producerede metan i hele den betragtede 100-årsperiode 2015-2115.

Periode	¹ Metanproduktion (%) af totalproduktion i perioden 2015-2115	² Nettometanopsamlings effektivitet ved 40, 60 og 80 % bruttoopsamlings effektivitet			³ Nettometanemission ved 100, 60, 40 og 20 % bruttoemission			
		40 %	60 %	80 %	100 %	60 %	40 %	20 %
2015-2020	25,6	10,3	15,4	20,5	23,1	13,8	9,2	4,6
2021-2035	34,6	13,9	20,8	27,7	31,2	18,7	12,5	6,2
2036-2045	12,5	5,0	7,5	10,0	11,3	6,8	4,5	2,3
2046-2115	27,2				24,5			

¹Beregnet ud fra data i Tabel 2.

²Nettometanopsamlings effektiviteter og nettometanemissioner er additive.

³Ved beregning af nettoemission antages det, at 10 % af den ikke-opsamlede metan oxideres i afdækningslaget.

3.3.2 Status i Danmark for energiudnyttelse af deponigas

Et antal deponier i Danmark er på nuværende tidspunkt udstyret med installationer til gasopsamling og efterfølgende energiudnyttelse af metangassen til el- og varmeproduktion. I Energistyrelsens årlige opgørelse af energiproducerende virksomheder i Danmark, "Energiproducenttællingen", indgår energianlæg til udnyttelse af deponigas. Ud over gasmotorer og varmekedler placeret på de respektive deponier indgår enkelte decentrale kraftvarmeværker, som benytter en lille del deponigas i deres brændselsblanding. I Energiproducenttællingen indgår data om anlægstype, el- og varmeproduktion samt brændselsforbrug. På grundlag af energiproduktion sammenholdt med brændselsforbrug kan energieffektiviteten for el- og varmeproduktion beregnes, hvilke er væsentlige parameter ved modellering af potentielle miljøpåvirkninger i denne miljøvurdering.

I datagrundlaget for Energiproducenttællingen fra 2013 (stillet til rådighed for DTU Miljø af Energistyrelsen) indgår 26 energiudnyttelses anlæg, som benytter deponigas (

Tabel 4). Energiudnyttelsesanlæggene indbefatter 21 gasmotorer og 3 varmekedler placeret på deponier. Desuden indgår deponigas som brændsel i to decentrale kraftvarmeværker forsynet med dampturbiner. Som det ses af Tabel 4, er biogasmotorer dominerende på deponier med gasopsamling og energiudnyttelse, og der fokuseres derfor i nærværende projekt udelukkende på energiudnyttelse vha. biogasmotorer. Det bemærkes desuden, at udnyttelse af varmeproduktion fra biogasmotorer kun sker i tre tilfælde ud af de 21 biogasmotorer, der er kendt til i 2013.

Tabel 4. Anlægstyper til el- og varmeproduktion på grundlag af deponigas fra danske deponier med gasopsamling. Tal i parentes angiver gennemsnitlig nettoenergieffektivitet i procent beregnet på grundlag af indfyret energimængde og leveret energi.

Anlægstype	Antal	Heraf med elproduktion	Heraf med varmeproduktion
Forbrændingsmotor	21	21 (27,8)	3 (51,9)
Kedel	3	0	3 (98,7)
Damp turbine	2	2 (28,9)	2 (52,2)

Opgørelsen er udarbejdet på baggrund af data fra Energitællingen 2013.

For forbrændingsmotorer bygger beregningen på et udvalg af fem anlæg, hvorfra der foreligger tilstrækkelige driftsdata.

Energitællingen bygger på indberetninger fra energiproducenterne, og datakvaliteten er afhængig heraf. Da den samlede energimængde produceret på grundlag af metan fra deponier på nuværende tidspunkt er forsvindende lille i det samlede danske energiregnskab, supplerer Energistyrelsen ufuldstændige data fra deponier med erfaringsdata fra drift af biogasmotorer i stedet for at undersøge hvert anlæg i detaljer. Det skønnes derfor, at et repræsentativt udsnit af driftsdata med fordel kunne opnås ved benyttelse af fem af de 21 biogasmotorer med elproduktion. Som det ses af

Tabel 4, var den gennemsnitlige energieffektivitet (beregnet af DTU på baggrund af indberetninger til Energistyrelsen til brug for Energiproducenttællingen 2013) på disse anlæg ved elproduktion 27,8 % af metangassens energiindhold. Der var dog et meget stort spænd mht. biogasmotorernes el-effektivitet, idet den lå mellem 19,8 og 39,3 %. Det fremgår ikke af data, hvad der er grunden til disse forskelle, men da metanindholdet i deponigassen sandsynligvis ikke er målt kontinuerligt, kan variationer i gaskvaliteten lede til hhv. over- og undervurderinger af energieffektiviteten. Derudover vil energieffektiviteten være afhængig af gasmotorens type og alder. Varmeeffektiviteten på de tre anlæg med udnyttelse af gasmotorens varmeproduktion var 51,9 % af metangassens energiindhold.

3.3.3 Dual-fuel deponigasmotorer

Gasmotorer til energiproduktion fra deponigas skal være i stand til at køre på gas med relativt lavt metanindhold, idet metan typisk udgør 50 % eller mindre (målt som mol og volumen) af deponigas. Ved anlæggelse af et nyt gasopsamlingsystem på et eksisterende deponi kan benyttelse af dual-fuel-teknologien, som tillader forbrænding af deponigas med lavt metanindhold, være hensigtsmæssig. På ældre deponier kan gasopsamling resultere i fluktuerende metankoncentration i den opsamlede gas. Dette skyldes bl.a., at den samlede metanproduktion aftager med tiden, således at opsamlingen af en tilstrækkelig mængde deponigas kræver kraftigere pumpning. Herved stiger risikoen for at trække atmosfærisk luft ind i gassen, hvilket kan lede til lavere metankoncentration. Paamand (2014) rapporterer metankoncentrationer i opsamlet deponigas på Stengården Losseplads (opfyldt i perioden 1972-1984), som fluktuerede mellem ca. 18 og 33 %, med hoveddelen af målingerne i intervallet 20-25 %. Paamand (2014) angiver, at dette deponi er udstyret med en dual-fuel-gasmotor som resultat af den lave metankoncentration i den opsamlede deponigas. For at imødegå problemer med gaskvaliteten i form af lav metankoncentration har man derfor på et antal deponier med gasopsamling installeret dual-fuel-gasmotorer, som benytter dieselolie som støttebrændsel i forbindelse med forbrænding af metanholdig gas. Herved bliver det muligt at udnytte deponigas med lavt metanindhold uden yderligere tilpasning af motorens drifts karakteristika. Dual-fuel-motorer har en vis udbredelse på danske affaldsdeponier, hvilket kan ses af Deponigas Aps' hjemmeside (tilgået august 2015), hvoraf det fremgår, at seks affaldsdeponier med gasopsamling er udstyret med dual-fuel-motorer. Det samlede antal af dual-fuel-anlæg på danske deponier er ukendt.

Driftsdata fra Stengårdens Deponi ved Hvalsø, som har gasopsamling og energiudnyttelse vha. en dual-fuel-gasmotor, er beskrevet af Paamand (2014). Rapporten omhandler bl.a. mængden af opsamlet deponigas, metanindhold, elproduktion samt brug af støttebrændsel i form af dieselolie over en periode på ca. syv måneder i 2014. Indholdet af metan i deponigassen lå mellem 18 og 33 % i måleperioden, med den største del af målingerne liggende i intervallet 20-25 %. Energiinput i form af dieselolie udgjorde mellem 17-20 % af det samlede energiinput (intervallet skyldes usikkerheden på metanindholdet i deponigassen). På baggrund af rapporten, kan dual-fuel-motorens samlede effektivitet for elproduktionen beregnes til ca. 27 % af den indfyrede energimængde.

Det bemærkes, at der ikke hos Paamand (2014) findes oplysninger om energieffektiviteten af de individuelle brændsler, som indgår i driften af dual-fuel-motoren, og om effektiviteten er afhængig af blandingsforholdet, hvilket kan være af betydning under drift med varierende metanindhold i deponigassen. I det hele taget er oplysninger om energieffektivitet og emissionsdata sparsomme for dual-fuel-motorer, der benytter deponigas. Der findes en del videnskabelige artikler, som omhandler forskellige

aspekter ved drift af dual-fuel-motorer med LPG-gas (flaskegas) og diesel, som beskrevet i et litteratur-review af Ashok et al. (2015). Det fremgår heraf, at motorbelastning og blandingsforhold mellem brændselstyperne samt teknisk udformning af motoren spiller en stor rolle for energieffektivitet og emissioner. Test af dual-fuel-motorer til tung trafik i transportsektoren, som benytter metan og diesel, kan findes i Olofsson et al. (2014), som beskriver miljøkonsekvenser ved implementering af denne type motorer på europæisk plan. Af de væsentligste resultater kan nævnes, at det vil være vanskeligt at leve op til Euro V og VI-standarderne, og at den samlede emission af drivhusgasser måske er større end ved brug af diesel alene. Det er dog vigtigt at understrege, at disse resultater ikke nødvendigvis gælder for dual-fuel-motorer, som opererer på deponigas.

3.3.4 Modellering af energiudnyttelse af deponigas

På baggrund af de foreliggende data om eksisterende anlæg i Danmark, som beskrevet i afsnit 3.3.2 og afsnit 3.3.3, blev energiudnyttelse af deponigas modelleret. Som det ses, er gasmotorer den mest anvendte teknologi, idet varmekedler og dampturbiner kun anvendes på få deponier. Det fremgår yderligere, at varmeproduktion fra gasmotoren ikke blev udnyttet i mere end tre ud af 21 tilfælde.

Det blev derfor valgt at benytte en gasmotor med energiudnyttelse ved elproduktion, men ikke udnyttelse af varmeproduktionen, som repræsenterende basissituationen ved anlæggelse af gasopsamling på et eksisterende deponi i Danmark. El-effektiviteten antoges at svare til den gennemsnitlige i 2013, dvs. 27,8 % af energiindholdet i brændslet, og i de tilfælde, hvor man vil udnytte varmeproduktionen, modelleres det med en energieffektivitet på 51,9 % (jævnfør

Tabel 4). Det antages desuden, at deponiet udstyres med en dual-fuel-gasmotor, som opererer på en blanding af deponigas og diesel, hvor diesel udgør 18,5 % af det samlede energiindhold i det indfyrede brændsel. Denne værdi repræsenterer gennemsnittet af de anslåede værdier fra Paamand (2014). På grund af mangel på data antages energieffektiviteten at være den samme per energienhed af metan og diesel, og der modelleres heller ikke ændrede emissioner fra dual-fuel-motoren i forhold til hvad, man kunne forvente ved individuel forbrænding af hhv. metan og dieselolie.

3.3.5 Modellering af substitueret energiproduktion

Idet Miljøstyrelsen refererer til et igangværende projekt (Samfundsøkonomisk vurdering af behandling af imprægneret træaffald, Deloitte & MST, 3. udkast maj 2015) antages, at den marginale el-produktion sker på baggrund af 100 % kul til og med 2020 og 50 % kul og 50 % vind fra og med 2021. Miljøstyrelsen mener, at det vil være rimeligt at regne med 50 % kul og 50 % vind fortsat frem til 2035, og herefter 100 % vind. Der antages derimod ikke at ske et skift i sammensætningen af den marginale varmeproduktion, der derfor antages at svare til den nuværende gennemsnitlige varmeproduktion i hele den betragtede periode.

Disse forudsætninger er derfor benyttet i projektet ved modellering af energisubstitution. Til at repræsentere marginal el produceret på 100 % kul anvendes en proces fra EASETECH-databasen, "Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal, Energy Quality, DK, kWh, 2006", som har en emissionsfaktor på 0,920 kg CO₂/kWh (denne værdi inkluderer alle opstrøms aktiviteter ved el-produktion). Emissionsfaktorerne for marginal el, baseret på 50 % kul og 50 % vind, beregnes som den halve af rent kul, svarende til 0,460 kg CO₂/kWh, og marginal el produceret på 100 % vind anses som værende CO₂-neutral. Det skønnes, at denne tilnærmelse mht. emissionsfaktoren for vindbaseret el-produktion ikke har betydning for miljøvurderingens resultater.

Som repræsentativ for "marginal" varmeproduktion benyttes ligeledes en proces fra EASETECH-databasen, "District Heating, marginal average, DK, kWh, 2012", som har en emissionsfaktor på 0,156 kg CO₂/kWh. Denne proces er benyttet i Jacobsen et al. (2013) som substitueret dansk fjernvarmeproduktion. Som alternativ til denne type varmeproduktion modelleredes en varmeproduktion med ren naturgas (med emissionsfaktor på 0,224 kg CO₂/kWh) som brændsel, idet den kunne være en mulighed som marginal varmeproduktion i en konsekvens-LCA.

4 Scenarier

Miljøvurderingen blev udformet som en scenarieundersøgelse, hvor der blev opstillet en række scenarier, som repræsenterer to principielt forskellige metoder til imødegåelse af metanemission fra deponier, dvs. et biocover og gasopsamling og energiudnyttelse. For fuldstændighedens skyld blev der også opstillet et scenarie, hvor der ingen afværgeforanstaltninger blev implementeret. Inden for de to metoder til imødegåelse af metanemission, blev der modelleret et antal scenarier med forskellige parameterværdier og rammebetingelser.

En liste over scenarierne kan ses i Tabel 5. "Scenarie I-ingen afvær." repræsenterer en situation, hvor der hverken implementeres biocover eller gasopsamling. Det antages dog, at der finder en vis oxidation sted i deponiets afdækningslag, selvom dette ikke er optimeret for metanoxidation. Oxidationen i afdækningslaget skønnes til at udgøre 10 % af metanproduktionen i deponiet.

Tabel 5. Oversigt over scenarier med angivelse af metanoxidation, bruttoopsamlings-effektivitet samt energieffektivitet (fed skrift angiver ændringer i forhold til basisscenarierne).

Teknologi	Scenarietegnelse	Oxidation i afdækningslaget (%)	Bruttoopsamlings-effektivitet (%)	Fjernvarme-effektivitet (%)	El-effektivitet (%)
Ingen afværgeforanstaltninger	I-ingen afvær.	10			
Biocover	B1-basis oxi.	⁽¹⁾ 80			
	B2-høj oxi.	90			
	B2-lav oxi.	70			
Gasopsamling med energiudnyttelse	G1-basis opsaml.	10	60		⁽²⁾ 27,8
	G2-høj opsaml.	10	80		27,8
	G3-lav opsaml.	10	40		27,8
	G1 med fjernvarm (genm.)	10	60	⁽²⁾ 51,9	27,8
	G1 med fjernvarm (naturgas)	10	60	51,9	27,8
	G1 med høj el	10	60		⁽³⁾ 39,3
	G1 med lav el	10	60		⁽³⁾ 19,8
	⁽⁴⁾ G1 med basis opsaml. 30 år	10	60		27,8
	G2 bedst	10	80	51,9	39,3
	G3 dårligst	10	40		19,8
	G1 med biocover	80	60		27,8

¹Scheutz et al. (2014).

²Beregnet gennemsnit på baggrund af data fra Energiproducenttællingen 2013.

³Hhv. høj og lav el-effektivitet på baggrund af data fra Energiproducenttællingen 2013

⁴I dette scenarie er gasopsamlingsperioden sat til 30 år fra 2015 til 2045. I alle andre gasopsamlingsscenarier er gasopsamlingsperioden 20 år fra 2015 til 2035.

Scenarierne "B1-basis ox.", "B2-høj oxi." og "B3-lav oxi." repræsenterer implementering af et biocover, modelleret med en metanoxidationseffektivitet på hhv. 80, 90 og 70 % som beskrevet i afsnit 3.2. Oxidationen i biocoveret er nettoværdier, som inkluderer en eventuel oxidation i et eksisterende afdækningslag. Da der kun indgår drivhuseffekt forårsaget af metanemission til atmosfæren, beskriver oxidationen i biocoveret fuldstændigt systemet. Emissioner ved produktion og transport af have-/parkkompost til biocoveret indgår ikke i miljøvurderingen – disse formodes at være relativt ens ved alternativ anvendelse af have-/parkkompost.

Gasopsamlingsscenarierne "G1-basis opsaml.", "G2-høj opsaml." og "G3-lav opsaml." repræsenterer implementering af gasopsamling med varierende effektivitet på hhv. 60, 80 og 40 %. Der er tale om bruttoopsamlingseffektiviteter, som relaterer sig til mængden af deponigas produceret i opsamlingsperioden, som strækker sig over 20 år fra 2015 til 2035. Som nævnt ovenfor giver nettoopsamlingseffektiviteter, der angiver gasopsamlingen i forhold til produktionen i hele den betragtede 100-årsperiode et mere komplet billede af gasopsamlingseffektiviteten (nettoeffektiviteter er angivet i Tabel 3). I disse tre scenarier modelleres der kun energiudnyttelse i form af elproduktion.

De følgende fem scenarier er afledt af "G1-basis opsaml." med en opsamlingseffektivitet på 60 %, men forsynet med forskellige rammebetingelser og energieffektiviteter. I scenarierne "G1 med fjernvarm (genm.)" og "G1 med fjernvarm (naturgas)" antages det, at energiproduktionen ud over el inkluderer varmeproduktionen, som udnyttes til fjernvarme. Forskellen mellem de to scenarier relaterer sig til brændsels sammensætningen af den substituerede fjernvarmeproduktion, som har en emissionsfaktor på hhv. 0,156 kg CO₂/kWh ("genm.") og 0,224 kg CO₂/kWh ("naturgas"). De to scenarier "G1 med høj el" og "G1 med lav el" er modelleret med hhv. 39,3 og 19,8 % el-effektivitet, som beskrevet i afsnit 3.3.2.

Det næste scenarie, "G1 med basis opsaml. 30 år", har en gasopsamlingseffektivitet på 60 %, men opsamlingsperioden antages at fortsætte i 30 år fra 2015 til 2045 i modsætning til alle andre scenarier, hvor der er regnet med en 20-årig gasopsamlingsperiode.

De to scenarier "G2 bedst" og "G3 dårligst" er eksempler på den teoretiske spændvidde mht. valg af forudsætninger for gasopsamling. "G2 bedst" har således høj gasopsamling, udnyttelse af varmeproduktion med substitution af fjernvarme med høj emissionsfaktor samt høj eleffektivitet. I modsætning hertil har "G3 dårligst" lav opsamlingseffektivitet, ingen varmeudnyttelse og lav el-effektivitet.

Som en yderligere mulighed kunne man tænke sig, at en indledende gasopsamling af 20 års varighed kombineredes med efterfølgende anlæggelse af et biocover. Denne mulighed er modelleret i scenariet "G1 med biocover".

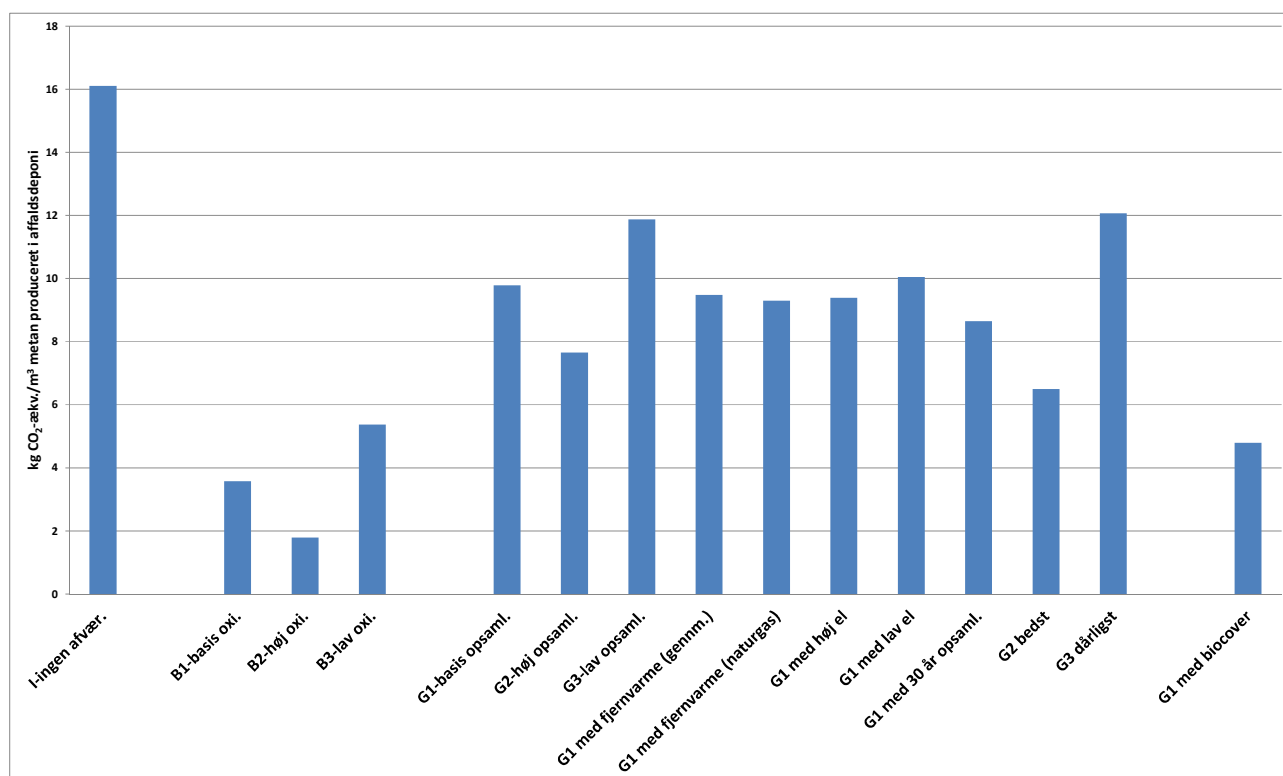
5 Resultater

Ved hjælp af LCA-modellen EASETECH blev der modelleret 15 scenarier (se Tabel 5 for detaljer) med varierende imødegåelse af metanemission fra danske affaldsdeponier, og de potentielle miljøpåvirkninger i påvirkningskategorien "drivhuseffekt" blev beregnet. Hovedformålet var at sammenligne biocover-metoden med gasopsamling og energiudnyttelse; som reference blev et scenarie uden afværgeforanstaltninger modelleret. Desuden modelleredes et scenarie med gasopsamling og energiudnyttelse kombineret med anlægning af et biocover. Den potentielle drivhuseffekt beregnedes som kg CO₂-ækvivalenter/Nm³ metan produceret i affaldsdeponiet i en 100-årsperiode fra 2015-2115.

Resultaterne afrapporteres i tre niveauer: Først præsenteres de samlede potentielle miljøpåvirkninger for scenarierne. Derefter vises de potentielle miljøpåvirkninger fordelt på de underprocesser, som indgår i scenarierne. Underprocesserne inkluderer metanemission gennem afdækningslaget, emissioner fra biogasmotor samt energisubstitution af el- og fjernvarme. Det sidste niveau fokuserer på indflydelsen af at benytte en dual-fuel-gasmotor til energiudnyttelse. Her er de potentielle miljøeffekter ved emissioner fra gasmotoren og substitution af energiproduktion fordelt på brændselsandelen af metan og dieselolie.

5.1 Den samlede potentielle drivhuseffekt i scenarierne

Den samlede potentielle drivhuseffekt i scenarierne målt i kg CO₂-ækvivalenter per Nm³ metan produceret på det generiske, danske affaldsdeponi kan ses på Figur 6.



Figur 6. Den samlede potentielle drivhuseffekt i 15 scenarier med varierende imødegåelse af metanemission fra danske affaldsdeponier.

Søjlen længst til venstre viser den potentielle drivhuseffekt i scenarie "I-ingen afvær.", hvor der ikke forekommer nogen form for imødegåelse af metanemissionen fra deponiet. Emissionerne i dette scenarie andrager 16,1 kg CO₂-ækvivalenter/Nm³ metan. Beregningen foregår som følger:

$$\text{Antal kg CO}_2\text{-ækvivalenter} = 1 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \times 0,714 \text{ kg CH}_4/\text{Nm}^3 \times 25 \text{ kg CO}_2\text{-ækvivalenter/kg CH}_4 \times 0,9 \text{ (idet 10 \% af metanen oxideres i afdækningslaget)} = 16,1 \text{ kg CO}_2\text{-ækvivalenter.}$$

På tilsvarende vis beregnes potentiel drivhuseffekt i de resterende scenarier, med emissioner fra gasmotor samt sparede emissioner fra energisubstitution inkluderet. Det ses umiddelbart, at alle behandlingsscenarier er miljømæssigt set bedre end scenarie "I-ingen afvær.", idet de samlede emissioner er numerisk mindre end i scenarie "I-ingen afvær.". De tre scenarier B1, B2 og B3 repræsenterer biocover-metoden med hhv. 80, 90 og 70 % metanoxidationseffektivitet. De potentielle miljøeffekter er omvendt proportionale med oxidationseffektiviteten. Det ses, at biocover under disse forudsætninger er miljømæssigt bedre i drivhuseffektkategorien end samtlige scenarier med gasopsamling og energiudnyttelse. Ved kombination af gasopsamling med energiudnyttelse (med basisparametre) og efterfølgende anlægning af et biocover (scenarie "G1 med biocover") kan der opnås væsentlige forbedringer i forhold til de resterende gasopsamlingsscenarier.

Scenarierne G1, G2 og G3 repræsenterer gasopsamling med energiudnyttelse med varierende effektivitet på hhv. 60, 80 og 40 % af den producerede metan i affaldsdeponiet. Som forventet udviser scenariet med højest opsamlingseffektivitet den laveste potentielle miljøbelastning, men den relative forskel mellem scenarierne er mindre end mellem biocover-scenarier med varierende oxidationseffektivitet.

De to gasopsamlingsscenarier med 60 % gasopsamlingseffektivitet og substitution af el-produktion, som yderligere er forsynet med udnyttelse af varmeproduktionen, "G1 med fjernvarme (gennemsl.)" og "G1 med fjernvarme (naturgas)", kan sammenlignes med scenariet "G1 basis opsaml.", der kun har el-substitution. Det ses, at fjernvarmesubstitutionen kun har ringe betydning, idet miljøbesparelserne kun udgør nogle få procent i forhold til scenariet uden udnyttelse af varmeproduktionen, og at typen af fjernvarme, som substitueres, heller ikke spiller nogen væsentlig rolle.

Samme effekt som udnyttelse af varmeproduktion kan opnås ved forbedring af effektiviteten ved energiudnyttelse til el-produktion. I scenarie "G1 med høj el" antages el-produktionen at foregå med en energieffektivitet på ca. 39 %, som skal ses i forhold til de ca. 28 %, som anvendes i basisscenariet. Det resulterer dog kun i en forbedring på nogle få procent, og det er således ikke en parameter, som væsentligt kan ændre miljøprofilen af gasopsamling med energiudnyttelse. Tilsvarende resulterer en lavere energieffektivitet for el-produktionen i en ganske lille forværring i forhold til basisscenariet.

Som en hovedforudsætning for gasopsamlingsscenarierne blev det antaget, at opsamlingen foregik i en 20-års periode fra 2015-2035. Denne antagelse bygger på, at faldende gasproduktion i den efterfølgende periode vil gøre det vanskeligt at fortsætte gasopsamlingen af tekniske såvel som af økonomiske grunde. Hvis dette ikke skulle være tilfældet, viser scenarie "G1 med 30 års opsaml." resultatet af en udvidelse af opsamlingsperioden med 10 år til 2045 (bruttoopsamlingseffektiviteten antages at være 60 % som i basisscenariet). Dette resulterer i en lavere miljøbelastning end med 20-års opsamlingsperiode, men det bemærkes, at en øget opsamlingseffektivitet i 20-års perioden vil være mere effektivt, som det ses af scenarie "G2 høj opsaml.".

Ved kombination af de anvendte parametre kan det "bedste" og "dårligste" scenarie med gasopsamling og energiudnyttelse konstrueres. Scenariet "G2 bedst" har høj opsamlings effektivitet (opsamlingsperioden på 20 år er dog opretholdt), høj el-effektivitet samt varmeudnyttelse med substitution af naturgasfyret fjernvarme. Scenariet "G3 dårligst" har lav opsamlings effektivitet, lav el-effektivitet og har ikke varmeudnyttelse. Forskellen mellem disse scenarier er væsentlig, idet den andrager ca. 45 %, men selv det "bedste" scenarie med gasopsamling og energiudnyttelse har en større potentiel drivhuseffekt end biocover-metoden med lav oxidationseffektivitet.

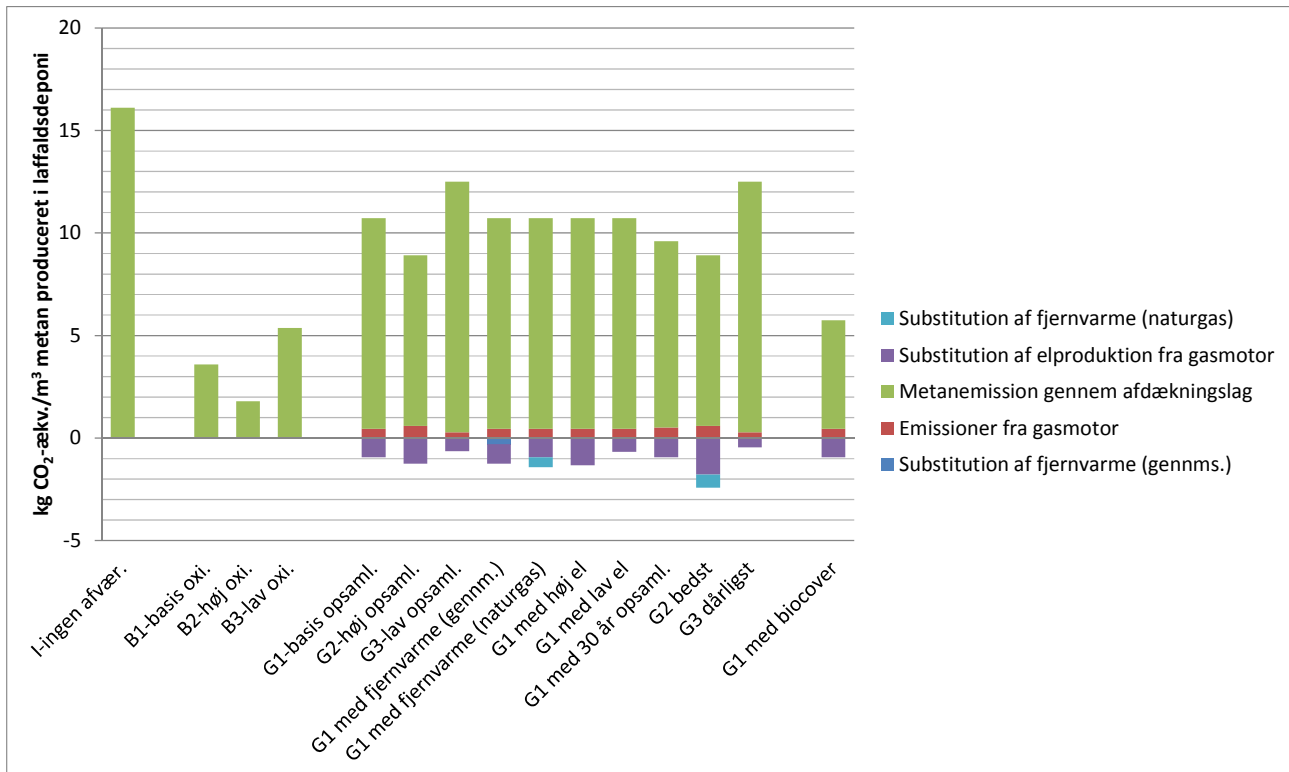
Baseret på disse resultater er det nærliggende at betragte en situation, hvor man kombinerede gasopsamling med anlægning af et biocover. I scenarie "G1 med biocover" er det antaget, at gasopsamling og energiudnyttelse i 20 år med 60 % bruttoeffektivitet blev efterfulgt af anlægning af et biocover med oxidationseffektivitet på 80 % som i B1-scenariet. Det medfører en væsentlig forbedring mht. potentiel drivhuseffekt i forhold til de resterende gasopsamlings scenarier, men sammenlignet med B1-scenariet er denne løsning stadig ikke lige så hensigtsmæssig. Det bemærkes, at "G1 med biocover" viser mindre miljøbelastning end scenarie "B3 lav ox.". Denne sammenligning er dog mindre relevant, da det forekommer korrekt kun at sammenligne kombinationsscenarioet med gasopsamling og efterfølgende biocover med et biocover-scenarie, hvor biocoveret i begge tilfælde har samme oxidationseffektivitet.

5.2 Potentiel drivhuseffekt i scenarierne fordelt på underprocesser

For at få et mere detaljeret billede af årsagerne til forskelle mellem scenarierne, fordeltes de potentielle miljøpåvirkninger på underprocesserne "Substitution af fjernvarme (naturgas)", "Substitution af elproduktion fra biogasmotor", "Metanemission gennem afdækningslag", "Emissioner fra biogasmotor" og "Substitution af fjernvarme (gennemsn.)". Som det ses af Figur 7, er den altdominerende underproces "metanemission gennem afdækningslag", som langt overskygger miljøbesparelserne i gasopsamlings scenarierne ved energiproduktion og resulterende substitution af fossil energi.

Selv ved høj gasopsamling (80 %) er den potentielle drivhuseffekt, som skyldes metanemission gennem afdækningslaget, dominerende. Det skyldes, at opsamlingen kun sker i 20 år, hvorefter 90 % af metan produceret i den resterende periode ender direkte i atmosfæren. Som det kan beregnes af Tabel 3, tabes der i alle gasopsamlings scenarier 35,8 % af metanen produceret i 100-års-perioden i perioderne uden opsamling, dvs. fra 2036-2045 og 2046-2115. Desuden tabes der metan i opsamlingsperioden, da opsamlings effektiviteten højst udgør 80 %.

En måde at illustrere dette forhold på er at sammenholde "emissionsfaktoren" for metanemission fra affaldsdeponiet beregnet ud fra figurens scenarie "1 – ingen afvær.". Ved antagelse af et energiindhold for metan på 37 MJ/Nm^3 , bliver "emissionsfaktoren" ca. $1,6 \text{ kg CO}_2\text{-ækvivalenter/kWh metan}$. Substitutionsværdien for marginal elproduktion og varmeproduktion er hhv. 0,920 og maksimalt 0,224 $\text{kg CO}_2\text{-ækvivalenter/kWh}$. Da der desuden skal tages hensyn til energieffektiviteten for el- og varmeproduktionen, bliver det klart, hvorfor metanemissionen gennem afdækningslaget vejer tungest. Ved gasopsamling og energiudnyttelse kan 1 kWh metan således højst substituere ca. 0,37 $\text{kg CO}_2\text{-ækvivalenter}$ (ved el- og varmeeffektivitet på hhv. 27,8 og 51,9 %), mens miljøbelastningen ved emission af 1 kWh metan er 1,6 $\text{kg CO}_2\text{-ækvivalenter}$.



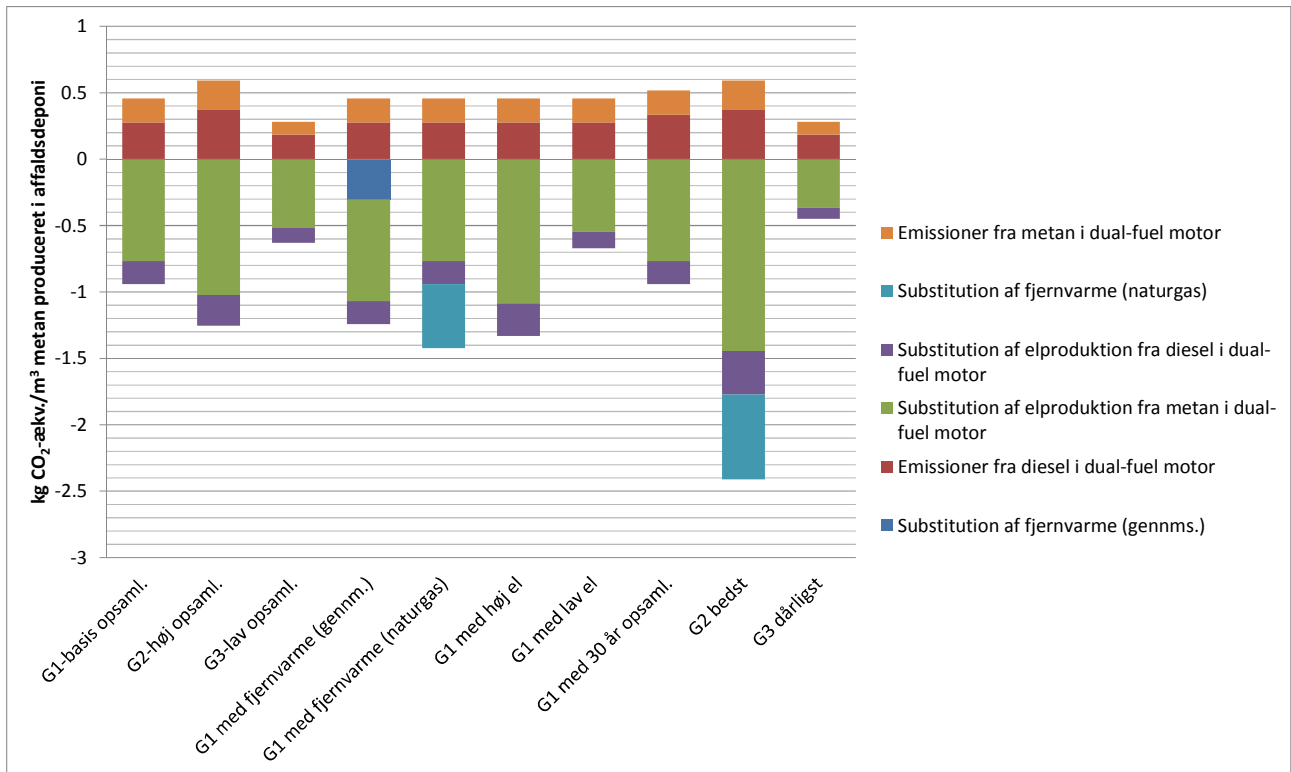
Figur 7. Den potentielle drivhuseffekt fordelt på underprocesser i 15 scenarier med varierende imødegåelse af metanemission fra et generisk dansk affaldsdeponi.

Som det ses af Figur 7, er elproduktion vigtigere end varmeproduktion i alle scenarier. Det skyldes, at emissionsfaktoren for den substituerede varmeproduktion er langt mindre end for marginal el-produktion. På den måde kan den høje energieffektivitet for varmeproduktion ikke opveje den lavere effektivitet for el-produktionen.

Emissionerne fra gasmotoren skyldes små mængder uforbrændt metan samt CO₂-emission fra forbrænding af dieselolie som støttebrændsel. CO₂ fra forbrænding af dieselolie er fossilt og regnes med i potentiel drivhuseffekt. Det ses, at disse emissioner er betydeligt mindre end gevinsten ved energisubstitution.

5.3 Potentiel drivhuseffekt forbundet med anvendelse af dual-fuel-motor

Som nævnt er alle gasopsamlingsscenerier modelleret med dual-fuel-gasmotor, som benytter dieselolie som støttebrændsel. For at kunne se effekten af dette i detaljer, fordeltes den potentielle drivhuseffekt forbundet med energiudnyttelse til el-produktion på de to brændselstyper (da varmeproduktionen har mindre betydning, blev denne ikke opdelt), idet det antoges, at energieffektiviteten var den samme for metan og diesel, når de forbrændes samtidigt i en dual-fuel-motor. På samme vis blev det forudsat, at mængden af uforbrændt metan i motoren ikke øgedes under dual-fuel-drift. Resultatet er vist på Figur 8.



Figur 8. Den potentielle drivhuseffekt fordelt på underprocesser relateret til dual-fuel-gasmotoren i gasopsamlingsscenerierne. Størrelsen af den samlede potentielle drivhuseffekt for underprocesserne er den samme som i foregående figur, men emissioner fra gasmotoren og el-substitution er fordelt på hhv. metan og dieselolie.

Som det første bemærkes det, at den potentielle miljøbelastning fra uforbrændt metan i gasmotoren ikke er uvæsentlig, selvom forbrænding af diesel gav ophav til større potentiel drivhuseffekt. Det ses desuden, at den øgede drivhuseffekt ved forbrænding af diesel i alle tilfælde var større end miljøbesparelsen ved elproduktion fra forbrænding af diesel. I scenarier udelukkende med elproduktion bidrager støttebrændslet således ikke til netto-miljøbesparelser. På figuren er varmeproduktionen ikke fordelt på metan og dieselbrændslet, men i scenarie "G2 bedst" vil fordeling af varmeproduktionen på metan og diesel resultere i, at de potentielle miljøbelastninger ved forbrug af diesel som støttebrændsel vil være mindre end miljøbesparelserne ved energisubstitution.

6 Konklusioner

Der blev udført en livscyklusbaseret miljøvurdering af imødegåelse af metanemission fra affaldsdeponier ved implementering af hhv. biocover og gasopsamling med energiudnyttelse. På baggrund af en række forudsætninger om gasproduktion på danske affaldsdeponier, de involverede teknologiers effektivitet samt sammensætningen af substitueret energiproduktion, blev der modelleret en række scenarier vha. LCA-modellen EASETECH. Ved hjælp af modellen blev de potentielle miljøpåvirkninger i miljøpåvirkningskategorien "drivhuseffekt" beregnet.

Ud fra disse resultater kan følgende overordnede konklusioner angående biocover-metoden og gasopsamling med energiudnyttelse drages:

- Både biocover og gasopsamling leder i alle scenarier til en væsentlig potentiel miljøforbedring i forhold til ingen afværgeforanstaltninger.
- Ved en effektivitet af biocover på 70 til 90 % leder alle biocoverscenarier til mindre potentielle miljøbelastninger end gasopsamlingsscenarioerne.
- Hvis biocover har 80 % effektivitet i hele 100-års-perioden, kan det ikke overgås af et kombinationsscenario, hvor gasopsamling med basisparametre (60 % bruttogasopsamlingseffektivitet og 27,8 % el-effektivitet) kombineres med efterfølgende anlæggelse af et biocover med 80 % effektivitet.
- Metanemission gennem afdækningslaget er den dominerende underproces i alle scenarier – også i gasopsamlingsscenarioer.
- Opsamlingsscenarioerne udviser miljøbesparelser fra substitution af el og varme, men det kan ikke opveje miljøbelastningerne ved metanemission gennem afdækningslaget.

Under de givne basisforudsætninger er biocover miljømæssigt mere hensigtsmæssigt end gasopsamling. Dette skyldes hovedsageligt, at metanemissionen gennem afdækningslaget i og efter gasopsamlingsperioden spiller en afgørende rolle for gasopsamlingsscenarioerne.

7 Referencer

Ashok, B., Ashok, S.D. & Kumar, C.R. (2015) LPG diesel dual fuel engine – A critical review. Alexandria Engineering Journal 54: 105-126.

Barlaz, M.A., Chanton, J.P. & Green, R.B. (2015) Controls on Landfill Gas Collection Efficiency: Instantaneous and lifetime Performance. J. Air & Waste Manage. Assoc. 59: 1399–1404.

Clavreul, J., Baumeister, H. & Christensen, T. H. (2014) An environmental assessment system for environmental technologies. Environmental Modelling and Software 60: 18-30.

Deponigas.com (tilgået august 2015).

Energistyrelsen (2015) Baggrundsdata for Energiproducenttællingen 2013. Stillet til rådighed for DTU Miljø.

Gentil, E., Christensen, T.H. & Aoustin, E. (2010) Greenhouse gas accounting and waste management. Waste Management & Research 27: 696-706.

Huber-Humer, M., Gebert, J., Hilger, H. (2008). Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. Waste Management & Research 26, 33–46.

IPCC (2007) IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. [Online] <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>.

Jacobsen, J.B., Møller, J., Kromann, M., Neidel, T.L. & Jensen, M.B. (2013) Miljø- og samfundsøkonomisk vurdering af muligheder for øget genanvendelse af papir, pap, plast, metal og organisk affald fra dagrenovation. Miljøprojekt nr. 1458, Miljøstyrelsen.

Mou, Z.S., Scheutz, C., Kjeldsen, P. 2015. Evaluation and application of site-specific data to revise the first-order decay model for estimating landfill gas generation and emissions at Danish landfills. Journal of the Air and Waste Management Association 65 (6): 686-698.

Mønster, J., Samuelsson, J., Kjeldsen, P., Scheutz, C. 2015. Quantification of methane emission from 15 Danish landfills using mobile tracer dispersion method. Waste Management 35: 177–186.

Olofsson, M., Erlandsson, L. & Willner, K. (2014) Enhanced Emission Performance and Fuel efficiency for HD Methane Engines. AVL MCT Report OMT 1032 udført for International Energy Agency – Advanced Motor Fuels.

Paamand, E.T. (2014) Hvalsø. Stengårdens Losseplads. Driftsregnskab for gasanlægget ved Roskildevej 32. Geo projekt nr. 30619. Rapport nr. 5, 2014-11-07.

Scharff, H., Jacobs, J. (2006). Applying guidance for methane emission estimation. Waste Management 26 (4): 417–429.

Scheutz, C., Pedersen, R.B., Petersen, P.H., Jørgensen, J.H.B., Ucendo, I.M.B, Mønster, J.G., Samuelsson, J. & Kjeldsen, P. (2014) Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in Klintholm, Denmark using a passive biocover system. *Waste Management* 34: 1179-1190.

Scheutz, C., Fredenslund, A. M., Nedenskov, J., Samuelsson, J., and Kjeldsen, P. (2011) Gas production, composition and emission at a modern disposal site receiving waste with a low-organic content. *Waste Management*, 31(5): 946-955.

Scheutz, C., Fredenslund, A. M., Søndergaard, G.L., Kjeldsen, P. (2007) Investigation of emissions from the AV Miljø Landfill. Kgs. Lyngby, Institute of Environment & Resources, Technical University of Denmark (ISBN: 978-87-91855-36-8).

Scheutz C., Kjeldsen, P. (2010) Metoder til opgørelse af emissioner fra danske deponeringsanlæg til brug for PRTR-indrapportering. Hovedrapport. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet. Miljøstyrelsen 2010.