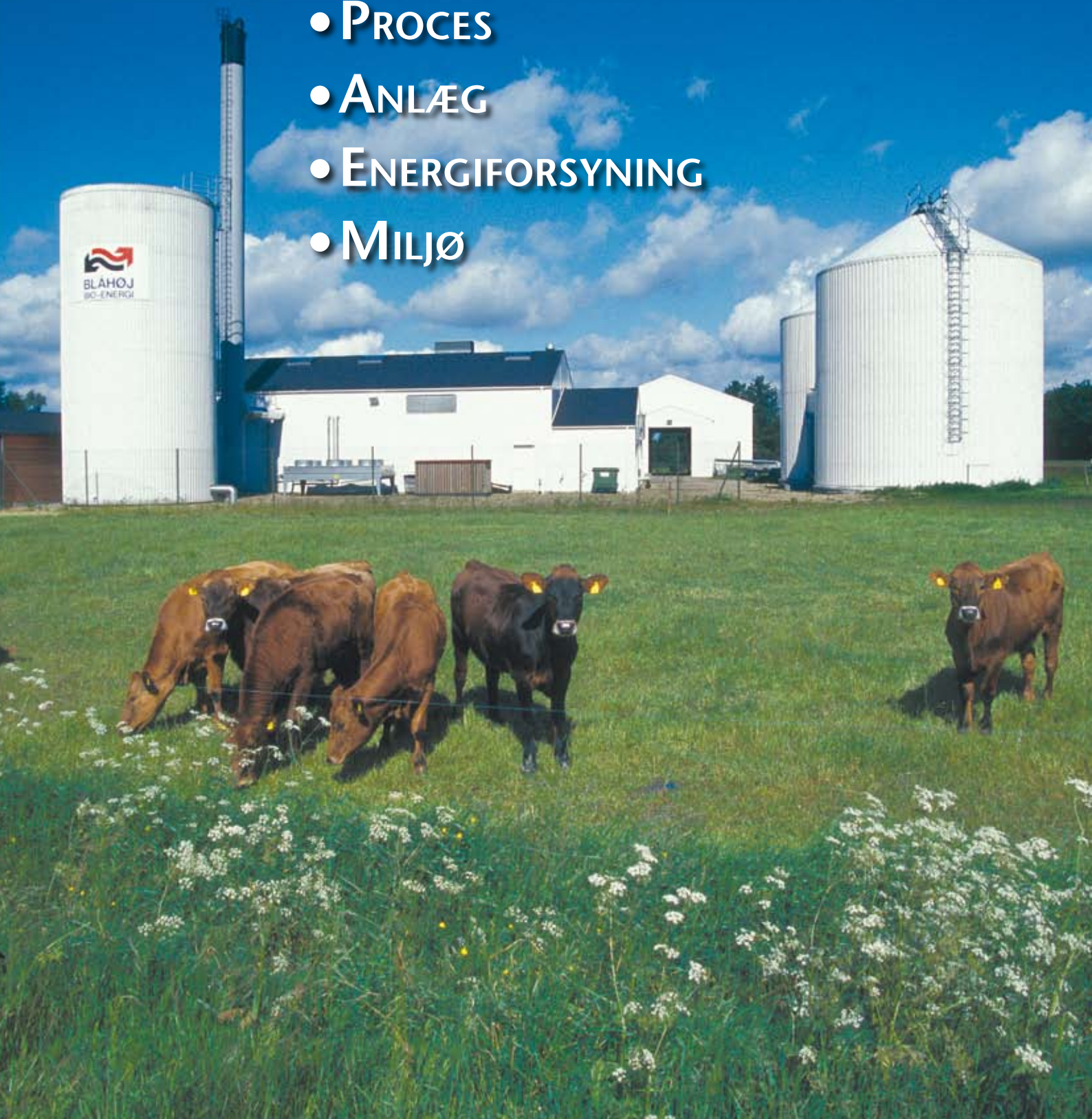


Peter Jacob Jørgensen, PlanEnergi

BIOGAS

– GRØN ENERGI

- PROCES
- ANLÆG
- ENERGIFORSYNING
- MILJØ



Biogas – grøn energi

Proces • Anlæg • Energiforsyning • Miljø

© Peter Jacob Jørgensen, PlanEnergi og *Forsker for en dag*
– Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet 2009
2. udgave 1. oplag

Redaktion: Anna Busch Nielsen

Tegninger og Grafisk Tilrettelægning: Erik Hjørne

Fotos:

Flemming Nielsen, Agromedia, side 15, 16, 17 og bagside

Torben Skøtt, BioPress, side 18 og forside

Emiliano Bruni, side 20

Sven Halling/Scanpix, side 6

Lehrstuhl für Thermodynamik, TU München, side 4

Lars Ellegaard, Lemvig Biogas, side 26

Tryk: Digisource Danmark A/S

Materialet må kopieres ubegrænset i sin helhed. Anvendelse af dele af materialet i andre sammenhænge må kun ske efter aftale med indehaverne af ©.

ISBN 978-87-992243-1-3

Forsker for en dag

Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet

Niels Pedersens Allé 2, · Foulum Postboks 10 · Dk-8830 Tjele

T: +45 8999 2511 · F: +45 8999 2599 · E: info@forskerforendag.dk · I: www.forskerforendag.dk

INDHOLD

Hvad er biogas?	4
Hvor dannes biogas?	5
Biogasproduktion historisk	6
Biogas i Ulande	7
Biogasprocessen	8
Hydrolyse	9
Fermentation – syredannelse	10
Metanogenese – metandannelse	10
Procesparametre for et biogasanlæg	11
Hæmning af biogasprocessen	12
Biogasanlæggets opbygning	15
Biomassesystem	16
Gassystemet	17
Gasanvendelse	18
Gasudbyttet af forskellige slags biomasse	19
Måling af gasudbytte	20
Udrådning i praksis	20
Biogaspotentialer	23
Nuværende forbrug og det fremtidige potentiale	25
Biogas og miljø	26
Klimaforandringer	26
Samlet CO ₂ -reduktionspotentiale ved biogasproduktion	28
Næringsstofudnyttelse og -tab	29
Lugt	30
Nedbrydning af miljøfremmede stoffer	31
Separation af afgasset biomasse	32
Stikordsregister	34

HVAD ER BIOGAS?

Biogas skal brænde så rent som muligt.

Biogas er en brændbar blanding af gasser (se figur 1). Den består hovedsagelig af metan (CH_4) og kuldioxid (CO_2), og dannes af organiske stoffer under bakteriel anaerob nedbrydning, dvs. uden ilt. Gasserne er affaldsprodukter efter mikroorganismers respiration, og biogassens sammensætning er afhængig af, hvad der nedbrydes. Består materialet hovedsageligt af kulhydrater, f.eks. glukose og andre simple sukkerstoffer samt højmolekylære stoffer (polymerer) som cellulose og hemicellulose m.v., bliver metanprocenten lav. Er indholdet af fedtstoffer derimod højt, bliver metanprocenten høj.

Metan, og den smule brint der måtte være, udgør den brændbare del af biogassen. Metan er en farve- og lugtløs gas, der har et kogepunkt på $-162\text{ }^\circ\text{C}$, og brænder med en blå flamme. Metan udgør også hovedbestanddelen (77 – 90 %) af naturgas. Kemisk hører metan til alkanerne, og er den simpleste af disse. Ved normalt tryk og temperatur har metan en vægtylde (densitet) på ca. $0,75\text{ kg/m}^3$. Biogas har

pga. indholdet af det tungere kuldioxid en lidt højere vægtylde på ca. $1,15\text{ kg/m}^3$. Ren metan har en øvre brændværdi på $39,8\text{ MJ/m}^3$, svarende til $11,06\text{ kWh/m}^3$. Blandes biogas med 5 - 20 % luft fås såkaldt knaldgas, der som navnet siger, er eksplosivt.

Gasart	%	
Metan (CH_4)	55 – 70	
Kuldioxid (CO_2)	30 – 45	
Svovlbrinte (H_2S)	}	
Brint (H_2)		1 – 2
Ammoniak (NH_3)		
Kulilte (CO)	spor	
Kvælstof (N_2)	spor	
Ilt (O_2)	spor	

Figur 1. Sammensætningen af biogas. Den nøjagtige sammensætning er bestemt af hvad der nedbrydes.

Brændværdi

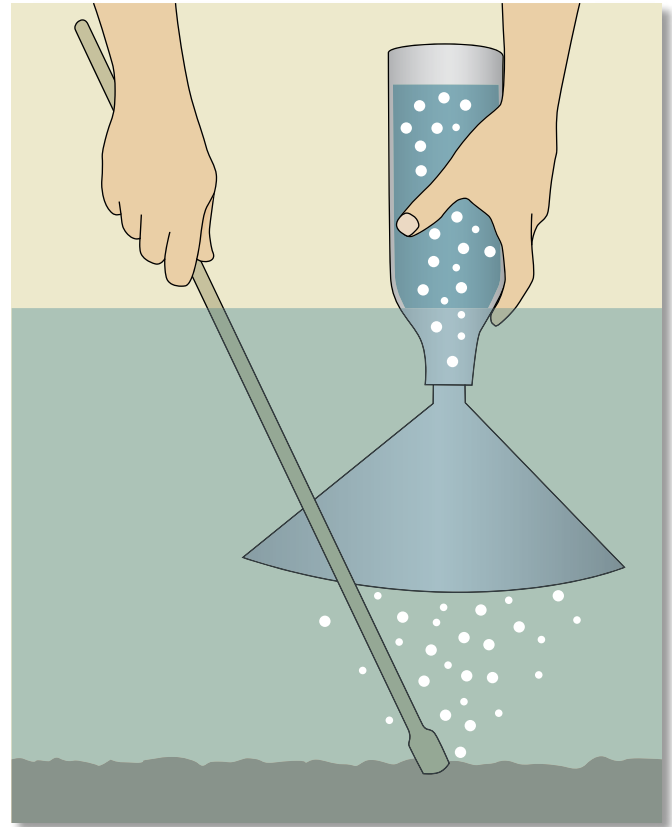
Den varmemængde der frigives ved fuldstændig forbrænding af en enhed af en brændbar masse.

Øvre brændværdi

Den varmemængde der frigives når røggassen køles så meget at vandindholdet (såvel brændslets indhold, som den mængde der dannes pga. forbrændingen) kondenserer og frigiver fortætningsvarme.

Nedre brændværdi

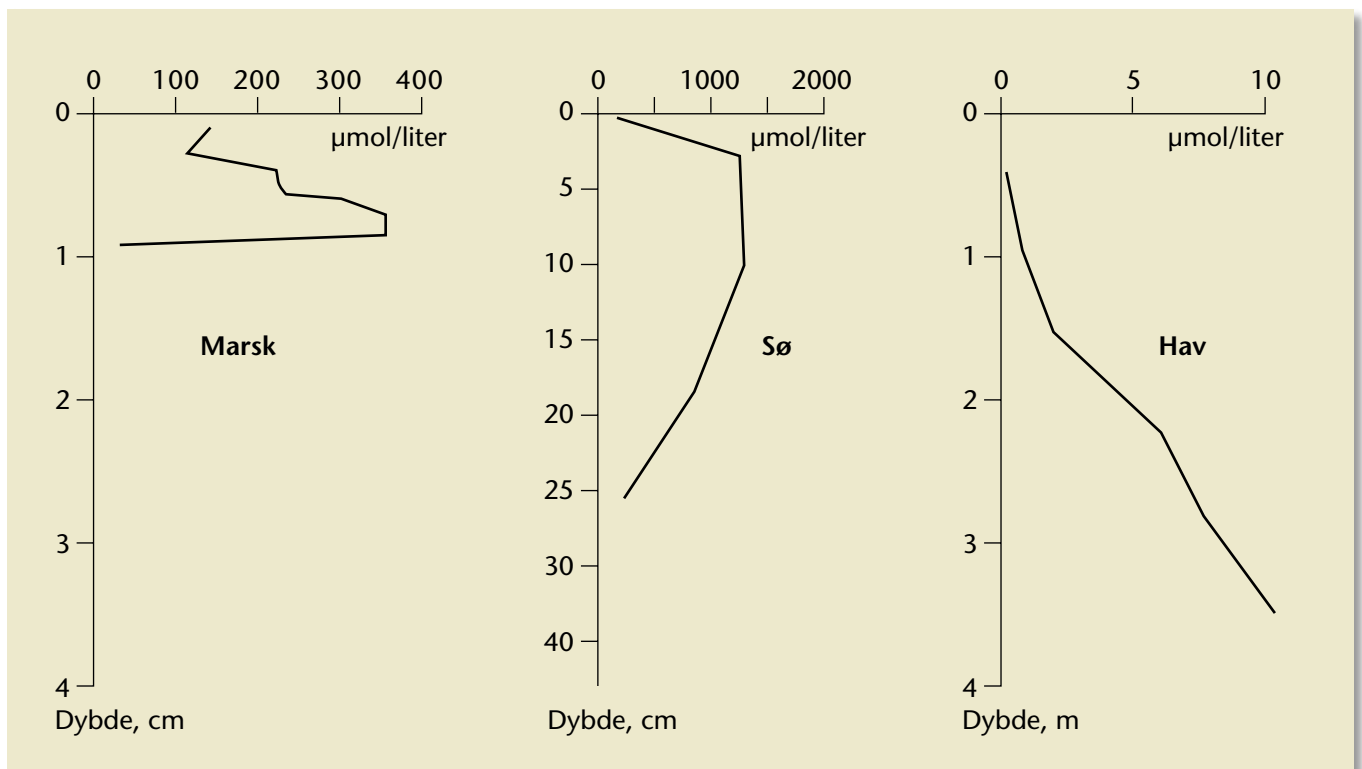
Den varmemængde der frigives når vandindholdet forbliver på dampform.



Figur 2. Biogassen, som dannes på bunden af moser og andre steder med naturlige iltfrie miljøer, kan opsamles i en omvendt flaske med tragt. Flasken skal være vandfyldt fra starten, så den opvældende metan kan fortrænge vandet uden at blandes med atmosfærisk luft.

HVOR DANNES BIOGAS?

Biogas dannes naturligt i sumpe, moser, rismarker etc. (se figur 2) og i sedimentet på bunden af søer og havområder, hvor der i en vis dybde er anaerobe forhold (se figur 3). Desuden dannes metan i vommen hos drøvtyggere (køer, får, hjorte, kameler, lamaer m.fl.).



Figur 3. Metankoncentrationen i sedimentet (bundlag) i marsk, søbund og havbund. Metankoncentrationen er et udtryk for mængden af metanbakterier.

Metans klimaeffekter

Det anslås, at menneskeskabte aktiviteter som kvægavl, risdyrkning, ophobning af affald på store lossepladser etc., siden 1800-tallet har medført en fordobling af atmosfærens indhold af metan til det nuværende niveau på ca. 1,7 ppm. Umiddelbart har det ingen helbredsmæssig betydning for mennesket. Men da metan indgår i atmosfærekemiske processer og også er en effektiv drivhusgas – ca. 22 gange kraftigere virkende end kuldioxid, CO_2 – er gassen med til at forøge drivhuseffekten. Metan har således bidraget med ca. 20 % af den samlede menneskeskabte forøgelse af drivhuseffekten.

Hvis drivhuseffekten medfører en øget temperaturstigning på Jorden, er der en risiko for at store tundraområder, der i dag er bundet af permafrost, langsomt vil tø op og dermed give anledning til emission af store mængder metan fra disse områder, når organiske materialer gradvist nedbrydes. Det vil selvsagt forværre drivhuseffekten yderligere (se figur 4).

Metan har desuden i større mængder en nedbrydende effekt på ozon, og et stigende eller øget udslip kan derfor få en uheldig indflydelse på ozonlaget, der er med til at beskytte kloden mod skadelig ultraviolet stråling fra solen.

BIOGASPRODUKTION HISTORISK

Naturlig produktion af biogas har været kendt siden 1600-tallet og allerede i midten af 1800-tallet begyndte man at eksperimentere med opbygning af egentlige biogassystemer og -anlæg. En af de ældste anlægstyper er septiktanken, som har været brugt ved rensning af spildevand siden slutningen af 1800-tallet og stadig anvendes ved fritliggende huse uden kloakering. I denne type anlæg opsamles og nyttiggøres den producerede gas dog ikke.

I 1890'erne konstruerede englænderen Donald Cameron en speciel septiktank, hvorfra gassen blev opsamlet og anvendt til gadebelysning. I Danmark begyndte man i 1920'erne at bygge biogasanlæg på rensningsanlæg. I starten blev gassen anvendt til opvarmning af rensningsanlæggets rådnetank, og hovedformålet var derfor ikke at udvinde energi, men derimod at nedbryde organiske stoffer i spildevandet og derved reducere og stabilisere slammet, der kommer ud af rensprocesserne.

I perioden til kort efter Anden Verdenskrig skete der en betydelig udvikling og anvendelse af biogasanlæg især i Tyskland, England og Frankrig, og metoden fandt efterhånden også anvendelse inden for landbruget med energiproduktion som hovedformål.



Figur 4. Rensdyr i tundralandskab på Svalbard. To aktører i metanproduktionen og dermed bidragydere til forøgelse af drivhuseffekten. Rensdyret er en drøvtygger som producerer metan i vommen, og tundraen frigiver metan fra sedimentet ved sommerens optøning af den frosne bund. I takt med den globale opvarmning vil der tø mere tundra, så der frigives mere metan, som vil bidrage til drivhuseffekten der vil øge den globale opvarmning. Og en 'ond spiral' er i gang.

I slutningen af 1950'erne gik udviklingen imidlertid næsten i stå pga. lave priser på fossile brændsler som kul og olie, og først i midten af 1970'erne blev interessen for biogas igen vakt pga. oliekrisen i 1973. Fra den danske stats side blev der investeret i et forsknings- og udviklingsprogram – det såkaldte STUB-program (Samarbejdsgruppen for Teknologisk Udvikling af Biogasanlæg) – der havde til formål at teste og opføre forskellige anlægstyper med husdyrgødning som væsentligste biomasse.

I dag (2009) er der i Danmark i alt omkring 60 biogasanlæg i drift på rensningsanlæg. Desuden er der fra midten af 1980'erne etableret ca. 20 større eller mindre biogasfællesanlæg, som behandler gødning, især gylle, fra en kreds af husdyrbrug. Desuden omsætter biogasfællesanlæggene store mængder organisk industriaffald fra forskellige levnedsmiddelindustrier og slagterier, hvorved energiindholdet i affaldet nyttiggøres og næringsstofferne recirkuleres til landbruget. Dertil kommer ca. 60 gårdanlæg samt en række lossepladsanlæg og biogasanlæg på forskellige industrier med organisk spildevand (se figur 5).

Udbygningen af biogassektoren i Danmark er igen gået i stå siden midten af 90'erne pga. for dårlige økonomiske vilkår. Med energifor-

liget i Folketinget i 2008 og en bedre afregning for biogasstrøm er der dog p.t. så småt ved at komme gang i sektoren igen.

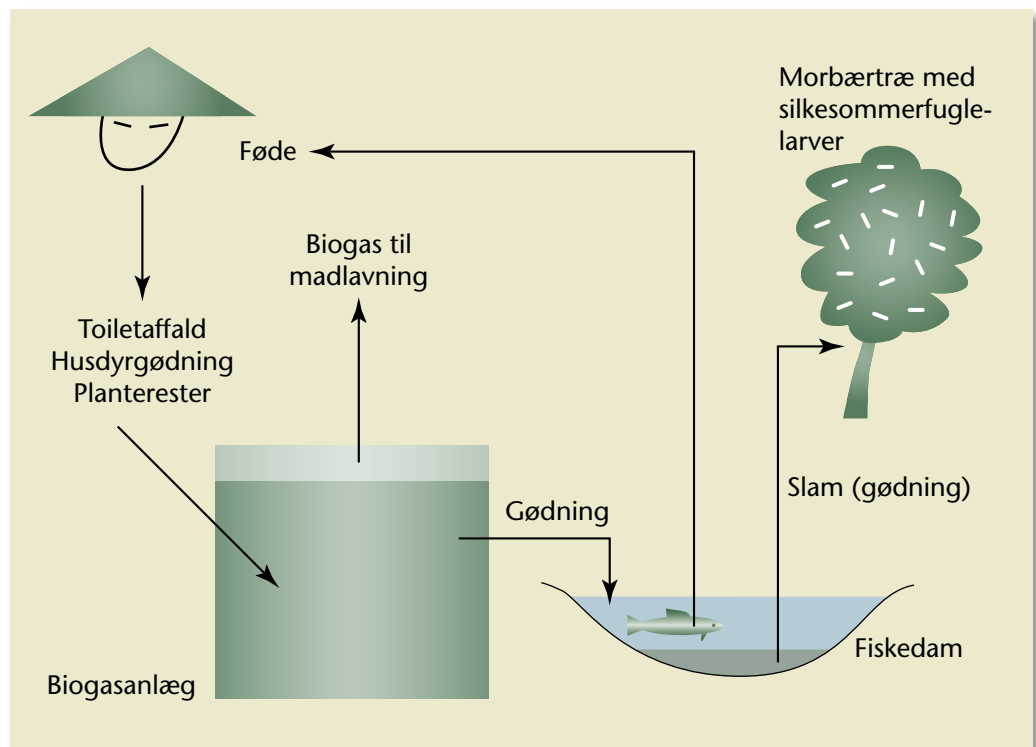
	Antal anlæg	Biogasproduktion i Danmark 2006 1.000 m ³
Kommunale renselanlæg	61	~ 40.000
Biogasfællesanlæg	19	~ 73.000
Gårdbiogasanlæg	57	~ 33.000
Lossepladsgasanlæg	25	~ 18.000
Industrianlæg	5	~ 7.000
I alt	167	~ 171.000

Den samlede bruttoproduktion svarer til ca. 4 PJ eller ca. 5 % af Danmarks samlede energiforbrug

Figur 5. Biogasproduktionen i Danmark i 2006.

BIOGAS I ULANDE

Også i en række udviklingslande anvendes biogasproduktion i stor stil. Alene i Indien og Kina findes over 1 mio. små simple anlæg, som behandler affald (toilet affald, husdyrgødning, planterester etc.) fra en enkelt husstand. Anlæggene er nedgravet i jorden og opvarmes ikke, og biogassen anvendes i husholdningen til madlavning og den udrådne biomasse anvendes som gødning (se figur 6).



Figur 6. Et interessant økologisk kredsløb med biogas som central enhed praktiseres flere steder i Kina.

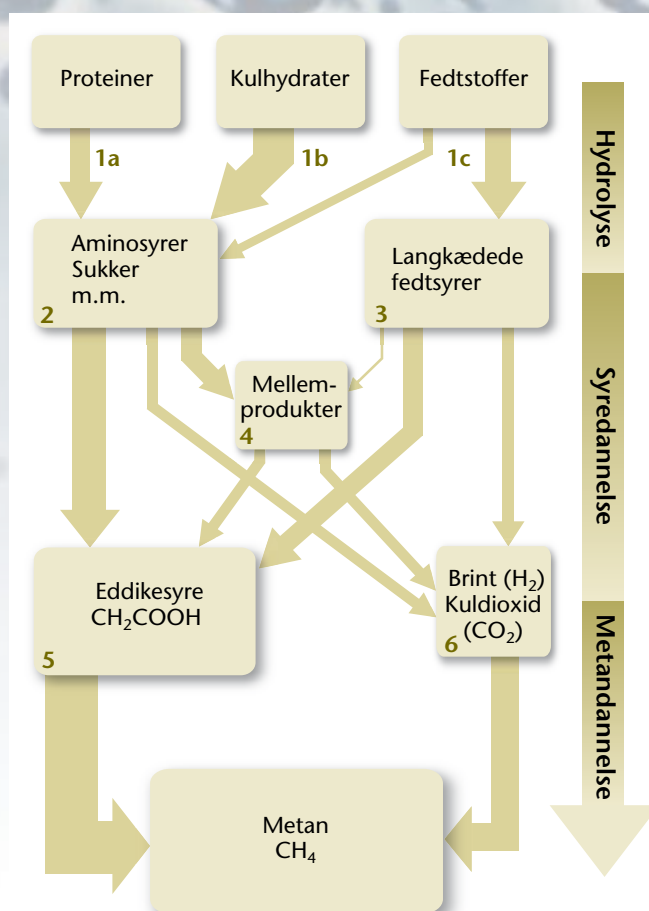
BIOGASPROCESSEN

Den fuldstændige biologiske nedbrydning af organiske stoffer til metan (CH_4) og kuldioxid (CO_2) under iltfrie forhold – dvs. anaerobt – er kompliceret og sker i et samspil mellem en række bakterier, der hver forestår deres del af opgaven. Det der er et affaldstof for én bakterie, er substrat (føde) for den næste, og bakterierne er på den måde afhængige af hinanden.

I forhold til den aerobe (iltrige) nedbrydning af organisk stof, er energiudbyttet langt mindre i den anaerobe proces. Nedbrydning af f.eks. glukose giver under aerobe forhold et nettoudbytte på 38 ATP-molekyler, mens den anaerobe nedbrydning kun giver et udbytte på 2 ATP-molekyler.

Det betyder, at vækstraten for anaerobe bakterier er betydeligt mindre end for aerobe, og at produktionen af biomasse (i form af levende bakterier) er mindre pr. gram organisk stof der nedbrydes. Hvor aerob nedbrydning af 1 g stof resulterer i produktion af 0,5 g biomasse, er udbyttet kun 0,1 g biomasse ved anaerob nedbrydning.

Man inddeler ofte biogasprocessen i tre trin: Hydrolyse, syredannelse og metandannelse, hvor forskellige bakteriegrupper står for hver deres trin (se figur 7).



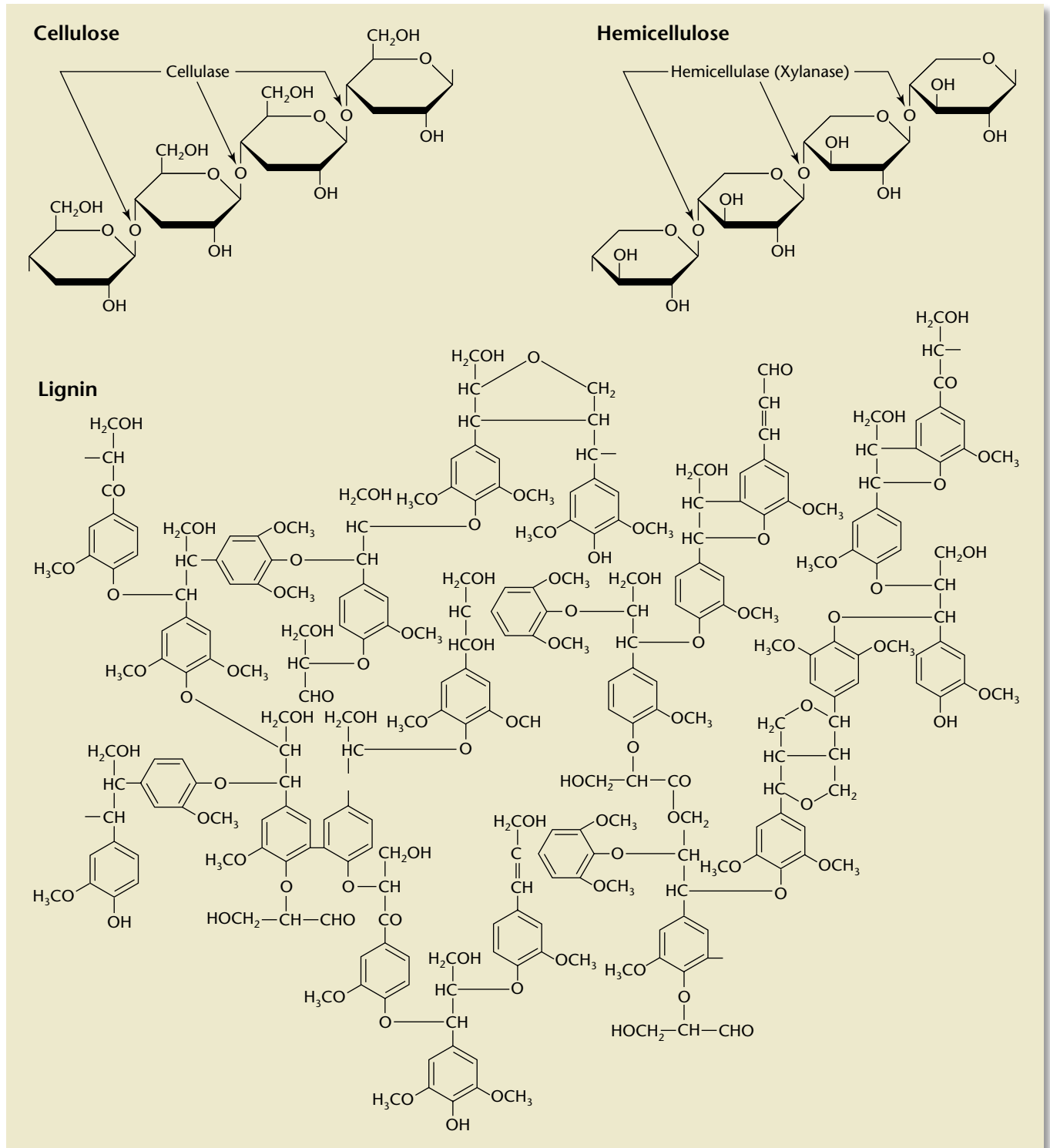
Figur 7. Den anaerobe nedbrydning af organisk stof består af tre hovedprocesser. A. Hydrolyse (1a, 1b, 1c). B. Syredannelse, også kaldet 'gæring' eller 'fermentation' (2, 3, 4). C. Metandannelse (5, 6).

HYDROLYSE

I hydrolysen nedbrydes højmolekylære stoffer, dvs. polymerer af proteiner, kulhydrater og fedtstoffer til lavmolekylære stoffer (monomerer). Forskellige specialiserede bakterier udskiller en række specifikke enzymer, der katalyserer nedbrydningen, der foregår ekstracellulært, dvs. uden for bakteriecellen i den omgivende væske.

Proteiner, simple sukkerstoffer og stivelse hydrolyseres let under anaerobe forhold. Lidt langsommere går det med andre polymere kulstofforbindelser, mens lignin, der udgør en stor bestanddel af planter, ikke kan nedbrydes anaerobt overhovedet.

Cellulose, der er en polymer sammensat af en række glucosemolekyler (se figur 8), og hemicellulose, der er sammensat af en række



Figur 8. Cellulose og hemicellulose er langkædede kulhydrater, der kan nedbrydes af specifikke enzymer som findes i visse bakterier, men ikke hos dyr. Lignin har en kompakt struktur og kan (praktisk taget) ikke nedbrydes biologisk.

andre sukkerstoffer, er komplicerede kulhydrater, der dog i princippet er forholdsvis lette at hydrolysere for specialiserede bakterier. Men i plantevævet er både cellulosen og hemicellulosen pakket godt ind i lignin og derfor svær at komme til for bakterierne. Derfor omsættes kun ca. 40 % af cellulosen og hemicellulosen i svinegylle i biogasprocessen. Normalt er nedbrydningen af organisk stof til metan og kuldioxid derfor ikke fuldstændig, og ofte kan kun regnes med en nedbrydning på 30 - 60 % for husdyrgødning og andre substrater med højt indhold af komplekse molekyler.

FERMENTATION – SYREDANNELSE

I en afbalanceret bakteriel proces nedbrydes ca. 50 % af monomererne (glukose, xylose, aminosyrer) og af de langkædede fedtsyrer (LCFA, Long Chain Fatty Acids) til eddikesyre (CH_3COOH). 20 % bliver til kuldioxid (CO_2) og brint (H_2), mens de sidste 30 % nedbrydes til andre kortkædede fedtsyrer end eddikesyre (VFA'er, Volatile Fatty Acids).

Fedtsyrer er monocarboxylsyrer, som findes i fedtstoffer. De fleste naturligt forekommende fedtsyrer indeholder et lige antal C-atomer. VFA'ere har mindre end 6 C-atomer. LCFA'ere har flere end 6 C-atomer (se figur 9).

Under ubalance bliver andelen af VFA'ere større med risiko for ophobning, og at proces-

sen 'løber sur', fordi de VFA-nedbrydende bakterier, der har en lav væksthastighed, ikke kan følge med. Kontinuert nedbrydning af volatile fedtsyrer er således kritisk og samtidig ofte en begrænsende faktor for biogasprocessen.

Hydrolyse af simple fedtstoffer resulterer i et mol glycerol og tre mol fedtsyrer (LCFA'ere). Store mængder fedtstoffer i substratet vil således resultere i store mængder langkædede fedtsyrer, mens store mængder proteiner, som jo indeholder kvælstof i aminogrupeer ($-\text{NH}_2$), vil resultere i store mængder ammonium/ammoniak ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$). I begge tilfælde kan dette føre til hæmning af de efterfølgende nedbrydningstrin, især hvis sammensætningen af biomasse-tilførslen varierer (se side 12).

METANOGENESE – METANDANNELSE

Det sidste trin i metandannelsen foretages af såkaldte metanogene bakterier eller metanogener. Metanogenerne er en speciel og meget gammel gruppe bakterier, der systematisk hører til i et helt specielt rige: Archaeobacteria. Et rige er den højeste systematiske enhed, og Archaeobacteria er derfor på niveau med de øvrige riger: planteriget, dyreriget, egentlige bakterier (Eubacteria), protozoer og svamperiget. Det menes, at metanbakterier har været blandt de første levende organismer på Jorden.

To forskellige grupper bakterier forestår metandannelsen. Den ene nedbryder eddikesyre (CH_3COOH) til metan (CH_4) og den anden danner metan ud fra kuldioxid (CO_2) og brint (H_2). Under stabile forhold kommer ca. 70 % af metanproduktionen fra eddikesyrenedbrydning, mens de sidste 30 % stammer fra kuldioxid og brint.

De to processer er i fin balance, og en hæmning af den ene vil også føre til en hæmning af den anden, og da metanbakterierne har den laveste væksthastighed af de involverede bakterier i hele processen, bliver de også den begrænsende faktor for, hvor hurtigt processen kan forløbe, og hvor meget materiale der kan omsættes. Metanbakteriernes væksthastighed er kun ca. 1/5-del af de syredannende bakteriers.

Som nævnt tidligere får metanbakterierne ikke meget energi ud af at nedbryde organisk stof (se figur 10). Men pga. de iltfrie betingelser, er konkurrencen fra andre bakterier ikke stor, og det er grunden til at de alligevel kan klare sig.

Monocarboxylsyrer	
VFA	
Myresyre	HCOOH
Eddikesyre	CH_3COOH
Propionsyre	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$
Smørsyre	$\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$
LCFA	
Laurinsyre	$\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$
Palmitinsyre	$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$
Stearinsyre	$\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$
Oliesyre	$\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ (1 dobbeltbinding)
Linolsyre	$\text{C}_{17}\text{H}_{31}\text{COOH}$ (2 dobbeltbindinger)
Linolensyre	$\text{C}_{17}\text{H}_{29}\text{COOH}$ (3 dobbeltbindinger)

Figur 9. Eksempler på fedtsyrer. Kortkædede fedtsyrer (VFA) har mindre end seks kulstofatomer i molekylkæden. Langkædede (LCFA) har flere end seks, ofte mange flere.

Stof	Proces	Energiudbytte kJ/mol metan
Brint	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	131
Myresyre	$4\text{HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	145
Metanol	$4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	105
Eddikesyre	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	36

Figur 10. Metanbakteriernes energiudbytte ved nedbrydning af forskellige stoffer.

PROCESPARAMETRE FOR ET BIOGASANLÆG

For at biogasprocessen kan forløbe effektivt og med et stort gasudbytte er der en række parametre, der skal være optimerede.

Anaerobt miljø

Som nævnt tidligere tåler metanbakterierne ikke ilt – de er obligat anaerobe. Et biogasanlæg skal derfor være tæt, så ilt ikke kan komme ind i anlægget. Den smule ilt som er opløst i væsken/biomassen, der tilføres anlægget, opbruges hurtigt af andre, som f.eks. aerobe bakterier, der *skal* have ilt, eller fakultativt anaerobe bakterier, der *kan* bruge ilt til deres respiration.

Temperatur

Generelt forløber biokemiske processer hurtigere, jo højere temperaturen er. Som tommelfingerregel fordobles hastigheden for hver 10 graders stigning inden for visse grænser ($Q_{10} = 2$). Sådan er det også med biogasprocessen. I dette tilfælde er der dog tale om flere bakterietyper eller stammer, der er tilpasset forskellige temperaturniveauer:

det psykrofile niveau 0 – 20 °C

det mesofile niveau 15 – 45 °C

det termofile niveau 40 – 65 °C

Fælles for bakterierne er, at de kun i ringe grad tåler svingende temperaturer. Denne følsomhed stiger med temperaturen. I praksis drives biogasanlæg enten ved ca. 37 °C (mesofilt), og her tåles udsving på ± ca. 2 °C, eller ved ca. 52 °C

(termofilt), hvor man skal forsøge at holde sig inden for en variation på ca. ± ½ °C.

Surhedsgrad (pH)

På trods af at metanbakterierne bl.a. lever af organiske syrer, tåler de ikke et surt miljø. Det optimale er pH mellem 6,5 og 8, med optimum ved 7,2. Ved balance i processen vil surhedsgraden i reaktoren ligge her omkring, og da bufferkapaciteten i reaktoren er meget stor, skal der meget til for at rykke på den. Systemet er med andre ord temmelig robust og stabilt. Gyllebaserede anlæg ligger ofte lidt højere (pH 8 - 8,3) pga. et højt ammoniumindhold.

Substrat (udgangsmateriale)

Næsten alle organiske stoffer kan nedbrydes anaerobt, men nedbrydeligheden kan øges på forskellig måde. Lignin er dog unedbrydeligt.

Findeling

Jo finere et materiale er, jo større er den relative overflade, og jo lettere kan bakterierne komme til at angribe materialet.

Tørstofindhold

Tørstofindholdet må ikke være højere end ca. 50 % for at bakterierne kan arbejde. I forhold til et biogasanlæg skal tørstofindholdet dog ned på 8 - 10 %, hvis man skal kunne pumpe med materialet. Et lidt højere indhold kan tolereres i specielle reaktortyper, hvor biomassen tilføres direkte.

Kulstof/kvælstof-forhold (C/N-forhold)

Som andre organismer skal metanbakterier bruge en række makro- og mikronæringsstoffer for at vokse (se figur 11). De vigtigste makronæringsstoffer er kvælstof (N), fosfor (P) og kalium (K). Kvælstof anvendes af bakterien til at danne proteiner. Indholdet af kvælstof angives ofte i forhold til kulstof, da dette siger noget om, hvorvidt der er tilstrækkelig kvælstof til stede for bakterien. Normalt skal C/N-forholdet være mindre end 30/1, da kvælstof ellers bliver den begrænsende faktor for bakteriernes vækst. På den anden side må kvælstofindholdet heller ikke blive for højt, da det så kan hæmme processen (se senere).

Essentielle mikronæringsstoffer	Optimal koncentration g/m ³
Barium (Ba)	0,05
Jern (Fe)	0,2
Kalcium (Ca)	0,03
Kobolt (Co)	0,005
Magnesium (Mg)	0,02
Molybdæn (Mo)	0,005
Nikkel (Ni)	0,01

Figur 11. Nødvendige mikronæringsstoffer i biogasprocessen og ca. optimal koncentration. Som med vitaminer for mennesker, er både for lidt og for meget, skidt.

Omrøring

Der findes en række forskellige anlægstyper, men for den almindeligste type – CSTR (Continuously Stirred Tank Reaktors) – skal biomassen omrøres temmelig kraftigt for at undgå dannelse af et uigennemtrængeligt svømmelag.

COD = Chemical Oxygen Demand = Kemisk Iltforbrug ved nedbrydning af organisk stof i vand. COD er et udtryk for hvor meget O₂ der skal til for at nedbryde organisk stof til CO₂ og H₂O. Det bruges oftest til at måle belastningen af vandmiljøer med organisk stof. Måles normalt i mg O₂ pr. liter vand. I biogasanlæg angives COD i kg/m³ = 1000 mg/L.

Organisk belastning

Tempoet hvormed man tilfører biomasse til reaktoren, skal afpasses efter metanbakteriernes væksthastighed. Organiske syrer skal fjernes i det tempo de bliver dannet. Normalt kan en CSTR-reaktor belastes med 1 - 6 kg COD pr. m³ reaktorvolumen pr. dag.

Tilføres mere end metanbakterierne kan nå at omdanne, løber processen sur. Desuden skal biomasse tilføres så jævnt som muligt, gerne fuldstændig kontinuert og med samme mængde hele tiden. Endelig er det vigtigt, at biomassesammensætningen er så ensartet som muligt. Skal man skifte substrat, skal dette ske gradvist for at nye bakterier kan nå at tilpasse sig de nye forhold.

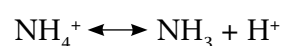
HÆMNING AF BIOGASPROCESSEN

Ved hæmning af processen forstås, at et eller andet stof påvirker bakterierne negativt uden direkte at slå dem ihjel. Hæmning kan ske på mange måder, og man opdeler hæmningerne efter *endogene* og *eksogene* årsager. Endogen hæmning skyldes forhold eller stoffer der dannes i processen, og som under specielle omstændigheder kan virke hæmmende, og eksogen hæmning skyldes udefrakommende forhold.

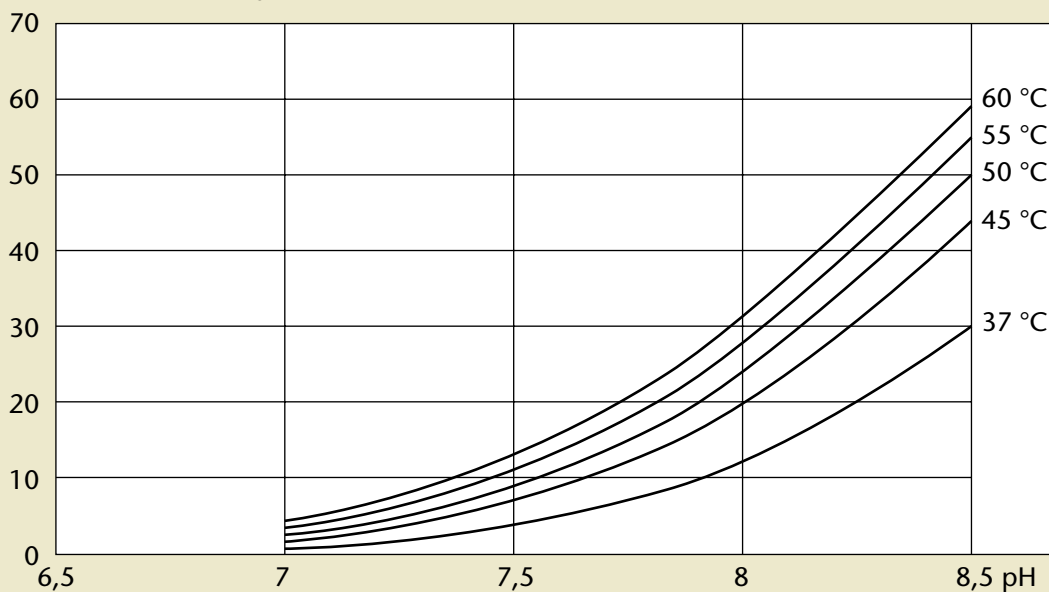
Kvælstofhæmning

Blandt endogene årsager er ammoniak (NH₃) en af de vigtigste. Ammoniak dannes under bakteriernes nedbrydning af kvælstofholdige stoffer, som f.eks. proteiner. Kvælstof er nødvendigt for bakteriernes vækst, og ammoniak er en vigtig kvælstofkilde. Men samtidig er ammoniak i høje koncentrationer stærkt giftig for bakterierne.

I en vandig opløsning findes ammoniak altid i en ligevægt med ammonium (NH₄⁺), og ligevægten er bestemt af surhedsgraden, pH-værdien, og temperaturen i miljøet, og da ammonium ikke på samme måde er giftigt, er denne ligevægt vigtig:



% fri ammoniak (NH₃)



Figur 12. Effekt af pH og temperatur på balancen mellem ammonium og giftigt ammoniak (NH₄⁺/NH₃).

Ved høj pH forskydes ligevægten mod højre, og miljøet bliver dermed mere giftigt for bakterierne. Også højere temperaturer forskyder ligevægten mod højre. Derfor er en termofil biogasproces alt andet lige mere følsom overfor ammoniakhæmning end en mesofil (se figur 12).

Allerede ved forholdsvis lave ammoniak-koncentrationer indtræder der en hæmning på bakterierne. Men bakterierne kan dog ved langsom tilvækning tilpasse sig et langt højere niveau, hvilket er heldigt, fordi de biomasser der typisk anvendes til biogasproduktion, f.eks. gylle, i de fleste tilfælde indeholder langt mere end den lave koncentration. Hvad bakterierne derimod dårligt tåler, er en pludselig stigning i koncentrationen, og det er derfor at ensartet og jævn biomassetilførsel er så vigtig for processen, og vigtigere jo højere temperaturen er.

Forsuring – organiske fedtsyrer

En anden vigtig endogen årsag til hæmning af processen er de organiske fedtsyrer, der dannes i processen. Fjernes disse ikke i den takt de dannes, og det kan ske ved overbelastning, kan det føre til forsuring af processen.

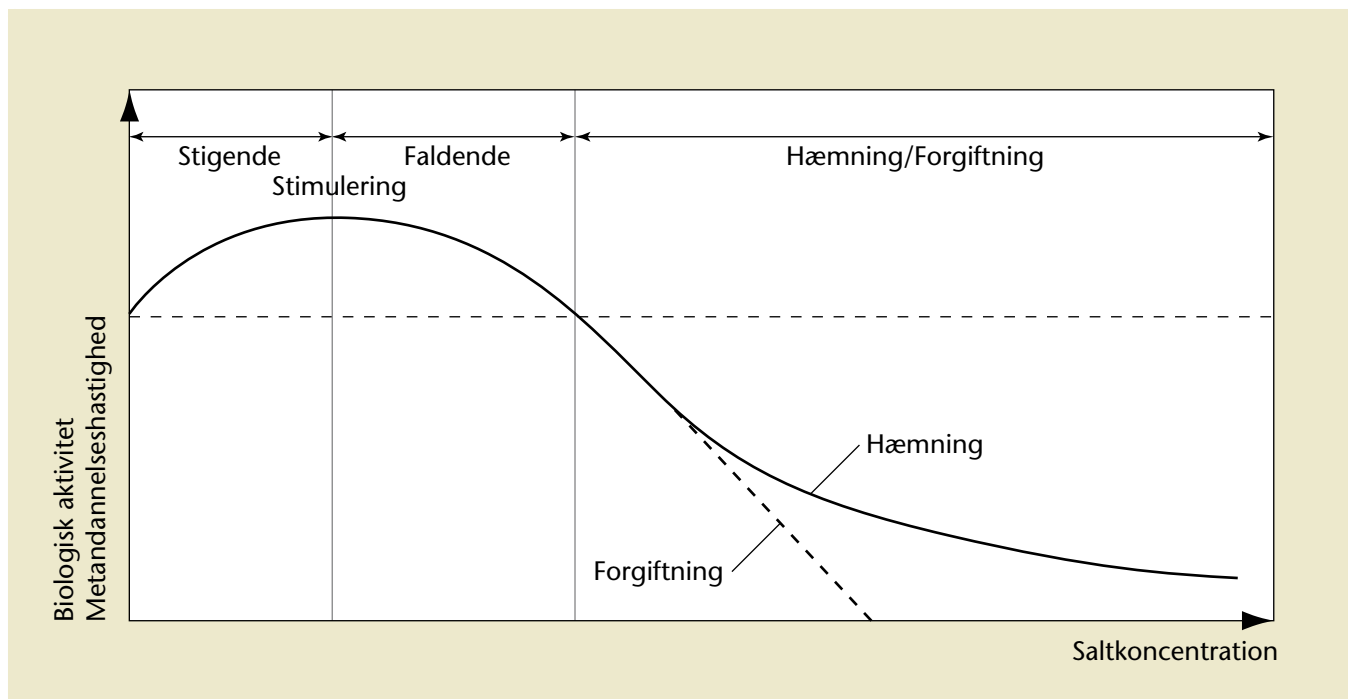
Antibiotika o.l.

Blandt eksogene (ydre) årsager siger det sig selv, at f.eks. antibiotika og desinfektionsmidler kan hæmme processen, fordi begge stofgrupper pr. definition er giftige overfor og anvendes til at dræbe mikroorganismer. Begge stofgrupper anvendes i husdyrproduktionen til helbredelse af syge dyr og rengøring af staldanlæg, og kommer derfor også i gyllen; tilsyneladende dog kun i så små mængder, at det ikke påvirker biogasanlæggene negativt. Også over for sådanne stoffer kan der ske en langsom tilvækning, hvis tilførslen er konstant.

Andre stoffer som tungmetaller, salte og mikronæringsstoffer kan i høje koncentrationer også virke hæmmende på processen (se figur 13 på næste side). Men som nævnt tidligere er nogle af disse i lave koncentrationer samtidig nødvendige for processen, som vitaminer er det for mennesker (se figur 14 på næste side).

Stof/formel	Hæmmende	Giftig
Ammoniak, fri, NH ₃	50-100 mg N/l	100-200 mg N/l
Ammoniak, total, NH ₄ ⁺ +NH ₃	1.000-6.000 mg N/l	10.000 mg N/l (pH<7,5)
Klorid, Cl ⁻	< 8.000 mg/l	10.000 mg/l
Cyanid, CN ⁻	2-20 mg/l	30 mg/l
Formaldehyd, H ₂ CO	100-400 mg/l	500-1.000 mg/l
Fenol, C ₆ H ₅ OH	100-200 mg/l	
Kloroform, CHCl ₃	>1 mg/l (enkelt dosis)	>50 mg/l (kontinuert tilførsel)
Hydrogen, H ₂	p(H ₂) ca. 10 ⁻⁴ atm.	
Kobber, Cu ⁺⁺⁺	10-250 mg/l	
Krom, Cr ⁺⁺⁺	50-100 mg/l	200-400 mg/l
Nikkel, Ni ⁺⁺	100-200 mg/l	300-1.000 mg/l
Natrium, Na ⁺	3.000-10.000 mg/l	
Calcium, Ca ⁺⁺	8.000 mg/l	
Magnesium, Mg ⁺⁺	3.000 mg/l	
Zink, Zn ⁺	350-1.000 mg/l	
Sulfat, SO ₄ ⁻	500-4.000 mg/l	
Sulfid, (som svovl)	200 mg/l	
Svovlbrinte, H ₂ S	250-1.000 mg/l	

Figur 13. Udvalgte hæmmende stoffer, inhibitorer, med størrelsesorden af koncentration for hæmning og giftvirkning.



Figur 14. Salte kan både stimulere og hæmme biogasprocessen. Det afhænger af saltkoncentrationen, hvornår hæmningen sætter ind. Nogle salte har ved høje koncentrationer en direkte giftvirkning.

BIOGASANLÆGGETS OPBYGNING

Der findes en række forskellige typer biogasanlæg, som kan anvendes til behandling af forskellige biomasse-typer, og hver har sine fordele og ulemper. Men i praksis anvendes på danske gårdbiogasanlæg og biogasfællesanlæg kun det fuldt omrørte anlæg (CSTR – Continuously Stirred Tank Reaktor).

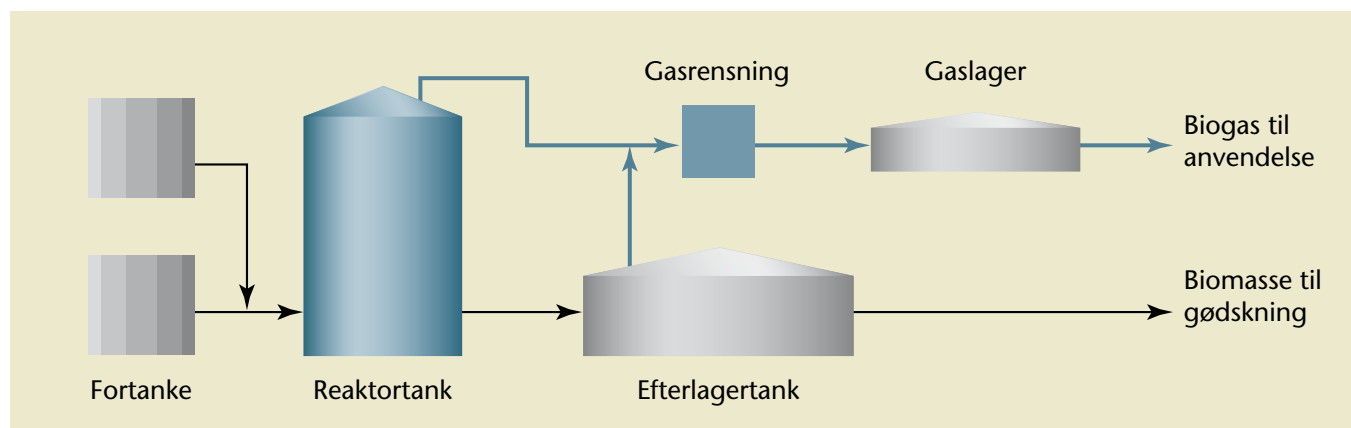
CSTR-anlægget har den fordel, at det kan behandle biomasser med et forholdsvis højt tørstofindhold. Biomasse indpumpes kontinuert, eller semikontinuert et antal gange om dagen. For at få plads til den nye biomasse, skal først udpumpes noget materiale, og pga. den kontinuerte omrøring betyder det, at en mindre del af den nyligt indpumpede, friske biomasse bliver pumpet ud igen for hurtigt, og inden det er fuldt udrådnnet, hvilket er den største ulempe ved denne anlægstype.

I industrien anvendes i få tilfælde såkaldte anaerobe filteranlæg, f.eks. slamtæppeanlæg,

UASB-anlæg (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), som er en anlægstype, der kan behandle biomasser med et lavt tørstofindhold. Fordelen ved denne type er, at opholdstiden (den tid en given biomasse er i reaktoren før udpumpning) er meget kort, ofte kun få timer eller et par dage, og at reaktortanken derfor ikke skal være så stor. Desuden kan denne anlægstype belastes forholdsvis hårdt med 5 - 30 kg COD pr. m³ pr dag.

I det følgende skal kun det fuldt omrørte anlæg behandles nærmere, da denne anlægstype er mest anvendt i Danmark både til udrådning af landbrugsbiomasser og spildevandsslam.

I princippet er gårdbiogasanlæg og biogasfællesanlæg opbygget på samme måde. Men de forskellige dele vil naturligvis have forskellig størrelse afhængig af biomasse-mængden og forholdene. Her beskrives et typisk fællesanlæg (se figur 15). Det kan opdeles i et biomassesystem og et gassystem.



Figur 15. Oversigtstegning af biogasfællesanlæg. Husdyrgødningen modtages i anlæggets fortanke, hvorfra det pumpes videre ind i reaktoren. Her finder udrådningen og biogasproduktionen sted. Fra efterlagertanken opsamles der også biogas.

BIOMASSESYSTEM



Fortank

Typisk findes flere fortanke. En til gylle og gødning og en til andre typer biomasse, f.eks. organisk industriaffald. Fortankenes formål er at virke som buffertanke, så der også er biomasse til brug i weekenden og på helligdage. Desuden blandes forskellige biomasser i fortankene, så den biomasse der tilføres reaktortanken bliver så ensartet som muligt. Fortanke til gylle har typisk en størrelse på op til ca. 7 døgn forbrug, og er oftest overdækkede betontanke. Fortanke til industriaffald har ofte en større kapacitet. Tankene er fuldt omrørte, så biomassen hele tiden er homogen, og i visse tilfælde kan industrifortanken være opvarmet, for f.eks. at holde fedt flydende. Specielt i gyllefortanken bundfældes store mængder sand, som fra tid til anden må graves op.

Nogle anlæg opererer desuden med en blandetank mellem fortankene og reaktortanken.

Fra fortankene udskilles betydelige mængder lugtstoffer, der kan bortventileres og nedbrydes i forskellige lugtrensingsanlæg.

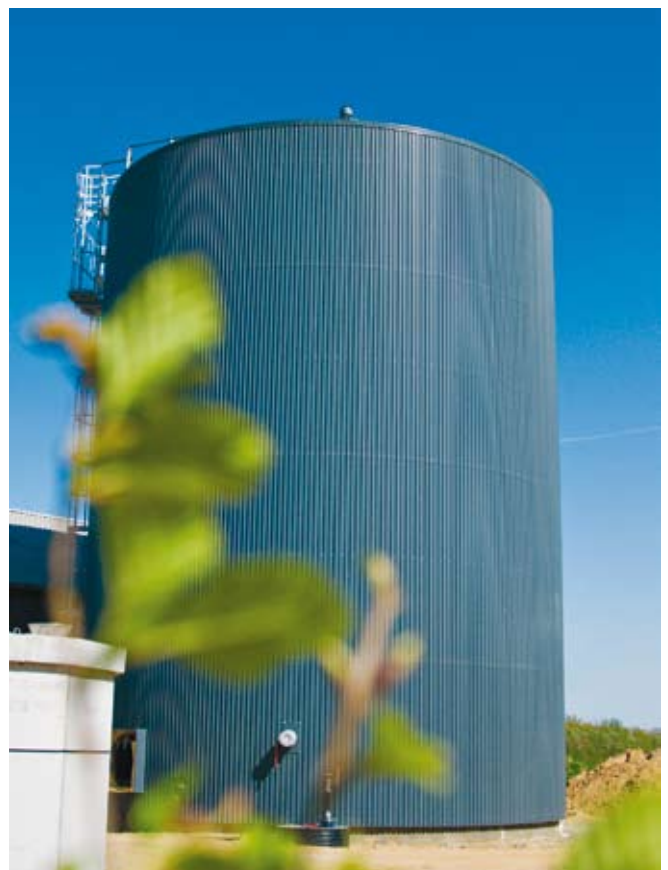
Indpumpnings-pumpe

Efter fortanken flytter en pumpe biomassen til reaktortanken. Pumpen kan være neddykket i fortanken, eller sidde i sin egen pumpebrønd. I tilknytning til pumpen findes ofte en såkaldt macerator, der findeler biomassen.

Reaktortank

Reaktortanken er en helt lukket og isoleret ståltank eller en betontank overdækket med en gastæt plasticmembran. Tanken kan være forsynet med varmespiraler, hvorigennem varme tilføres den udrådende biomasse, eller varmetilførslen kan ske uden for tanken i en varmeveksler. Tanken er forsynet med omrører, der kan holde hele volumen fuldt omrørt og således hindre svømmelagsdannelse. Desuden er den forsynet med overløbsrør, temperatur- og trykmålere etc. Endelig findes en overtryksventil, der skal sikre, at trykket ikke stiger uacceptabelt højt, hvis gasaftaget svigter. I toppen af tanken tages den producerede biogas ud.

Reaktortanken har typisk en størrelse på 10 - 20 gange den dagligt tilførte biomasse-mængde ved den termofile proces, og 15 - 25 gange tilførslen ved den mesofile.





Udpumpnings-pumpe

Efter reaktortanken har en pumpe til opgave at flytte udrådnet biomasse til en lagertank. I simple anlæg kan ind- og udpumpningspumpen, med det rette arrangement af rør og ventiler, være den samme.



Efterlagertank

Efterlagertanken har til formål at fungere som buffer inden den udrådnede biomasse kan køres væk og endeligt lagres i landmandens egen lagertank eller anvendes som gødning direkte på landbrugsjord.

Oftest er lagertanken overdækket, dels for at hindre regnvandstilførsel og dels for at hindre ammoniakfordampning. Er opholdstiden lang vil der desuden ske en vis gasproduktion i lagertanken, da biomassen i en fuldt omrørt reaktor aldrig vil være fuldt udrådnet. Også denne gasmængde kan opsamles og anvendes.

GASSYSTEMET

Gaskondensering

Fra reaktortanken og evt. efterlagertanken opsamles den producerede biogas. Gassen er varm og indeholder derfor store mængder vanddamp. Ved afkøling kan størsteparten af vandet udkondenseres og pumpes til efterlagertanken.

Gasrensning

Gassen indeholder ud over metan og kuldioxid også en mindre mængde svovlbrinte (H_2S). Mængden er proportional med biomassens indhold af protein. Jo mere protein, jo mere svovlbrinte. Skal biogassen anvendes til motordrift, skal svovlbrinten renses ud af gassen. Det kan ske i en biologisk proces, hvor man udnytter, at svovlbakterier kan nedbryde svovlbrinte til rent svovl eller svovlsyre. Dette svovl, i vandig opløsning, pumpes også ofte til efterlagertanken, og tilbageføres derfor til marken og planterne.



Gaslager

For at udjævne gasproduktionen har de fleste anlæg desuden et gaslager, der kan have en størrelse på fra få timers produktion til op mod et døgn. Biogas fylder meget, og det kan derfor sjældent betale sig at lave et alt for stort lager.

Gastransmission

På flere anlæg pumpes den rensede biogas herefter 5 - 10 km i en transmissionsledning til et kraftvarmeværk i nærheden, hvor biogassen evt. kan erstatte naturgas.

GASANVENDELSE



Gårdanlæg på Orø producerer el og varme til både ejendom og nærliggende institution. Den blanke cylinder i forgrunden er en lyddæmper.

Biogas er som nævnt brændbar og kan derfor anvendes til energiproduktion eller transport. Afgiftsmæssige forhold for det brændsel der fortrænges, er afgørende for hvilken slutanvendelse der er mest hensigtsmæssig.

Simplest sker anvendelsen i en gaskedel, hvor den producerede energi er varme, der kan anvendes til opvarmningsformål. Effektiviteten (årsvirkningsgraden) er ca. 85 %. Ved denne type anvendelse er det typisk fyringsolie, der fortrænges. Metoden anvendes i dag kun på mindre anlæg.

Bedre økonomi er der under danske forhold ved at anvende gassen til motorgeneratordrift. Motoren kan være en almindelig forbrændingsmotor. Motoren driver en generator, der producerer strøm. Kølevarme fra motoren og røggassystemet kan opsamles og anvendes til

opvarmningsformål. Typisk fås 30 - 40 % af biogassens energiindhold ud som elektricitet, der kan sælges til elnettet, og 45 - 55 % som varme (minus procesvarmeforbruget), som kan sælges til en varmeforbruger, almindeligvis et mindre fjernvarmeverk. Forholdet mellem el og varmeproduktion er afhængig af motorstørrelsen. Den samlede effektivitet er typisk omkring 85 %. Ved denne anvendelse fortrænges dels kul fra kraftværkerne og det brændsel, som varmeverket anvender (olie, naturgas eller biomasse).

Endelig kan biogassen anvendes til transportformål, og i den sammenhæng renser man ofte gassen for kuldioxid, så den ikke fylder så meget. Denne anvendelse benyttes ikke i Danmark, men er vidt udbredt i Sverige, hvor afgiftsforholdene er nogle andre. Med denne anvendelse fortrænges flydende brændstoffer som benzin eller diesel.

GASUDBYTTET AF FORSKELLIGE SLAGS BIOMASSE

Som tidligere nævnt kan alle organiske stoffer, på nær lignin, nedbrydes anaerobt til biogas. Derimod er der stor forskel på hvor lang tid det tager. Det hænger sammen med hvad biomassen består af: jo mere komplicerede molekyler, jo længere tid er mikroorganismene om at nedbryde dem.

Sædvanligvis er en biomasse desuden sammensat af en række forskellige stoffer, hvilket naturligvis også er væsentligt for gasudbyttet. Figur 16 viser biogas- og metanudbyttet ved fuldstændig nedbrydning af kulhydrat (cellulose), protein og fedt. Det ses at gasudbyttet er mere end dobbelt så højt fra fedt som fra protein og kulhydrat.

Af tabellen fremgår desuden, at sammensætningen af en biomasse – forholdet mellem kulhydrat, protein og fedt – er af betydning for hvor meget metan der er i biogassen, og dermed for dens brændværdi. Typisk ligger metanindholdet fra biogasanlæg baseret hovedsageligt på husdyrgødning på ca. 65 %, hvilket

skyldes, at en del CO₂ er opløst i den basiske væske. Indholdet i lossepladsgas kan være helt nede på 50 %.

Faktisk er biogasudbyttet af en biomasse temmelig præcist defineret: 1 kg COD (altså den mængde organisk stof der forbruger 1 kg O₂ ved total nedbrydning) omsat giver nemlig præcist 0,35 m³ metan ved normalt tryk og temperatur. Men desværre nedbrydes en biomasse sjældent fuldstændigt, eller i hvert fald tager det meget lang tid og er altså ikke noget man kan regne med i praktisk brug, hvor man jo er begrænset af reaktorens størrelse og dermed af den gennemsnitlige opholdstid (HRT – Hydraulic Retention Time). I figur 17 er som eksempel angivet nedbrydningsgraden af forskellige stoffer i svinegylle under normale procesforhold.

En forlængelse af opholdstiden vil naturligvis øge nedbrydningsgraden, mens en forkortelse vil mindske den. De tre nederste stoffer i figuren – polysakkariderne – spiller ofte den største rolle for gasproduktionen, fordi de fleste biomasser i hovedsagen er sammensat af disse tre stofgrupper.

Organisk stof	Proces	Gasudbytte, STP ¹⁾		CH ₄ %
		ml biogas/g	ml CH ₄ /g	
Cellulose	$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \rightarrow 3nCH_4 + 3nCO_2$	830	415	50,0
Protein	$2C_5H_7NO_2 + 8H_2O \rightarrow 5CH_4 + 3CO_2 + 2(NH_4)(HCO_3)$	793	504	63,6
Fedt ²⁾	$C_{57}H_{104}O_6 + 28H_2O \rightarrow 40CH_4 + 17CO_2$	1444	1014	70,2

Figur 16. Biogas- og metanudbyttet ved fuldstændig nedbrydning af kulhydrat (cellulose), protein og fedt.

¹⁾STP = Standard Temperature and Pressure (0 °C og 1 atm.). ²⁾Trioleinsyreglycerol.

Stof	Nedbrydningsgrad, %
Organisk stof (VS)	60
Protein	47
Fedtstoffer, lipider	69
Hemicellulose	65
Cellulose	69
Stivelse	94

Figur 17. Nedbrydningsgraden af forskellige stoffer i svinegylle. Organisk stof angives som askefrit tørstof, VS (Volatile Solids, den organiske, nedbrydelige del af tørstoffet).

MÅLING AF GASUDBYTTE

Gasudbyttet af en biomasse bestemmes ofte i laboratoriet ved udrådning i en batchreaktor, et portionsanlæg. En afmålt prøve hældes i en kolbe, podes med en kultur af anaerobe bakterier og stilles i vandbad med konstant temperatur og omrøring. En kontrolkolbe, som kun indeholder podemateriale stilles op ved siden af og gasproduktionen fra begge måles dagligt over længere tid. Ved at trække produktionen i kontrolkolben fra produktionen i kolben med prøven fås produktionen fra den biomasse der ønskes analyseret. I figur 18 ses en laboratorieopstilling til biogasforsøg.

Herved får man oplysninger om den akkumulerede gasproduktion – daglige målinger summeres – og hvis prøven udrådnes længe nok, får man til sidst tilnærmelsesvist et mål for biomassens totale biogaspotentiale. Måler man samtidig metanindholdet i biogassen, fås også det akkumulerede energipotential.

Tegner man herefter en kurve over den akkumulerede gasproduktion, får man et billede af hvor hurtigt biomassen udrådnes. I praksis har det betydning for, hvor stor man skal lave sin reaktor, og da reaktorvolumen er dyr at etablere, og derfor ikke kan gøres så stor at man kan få biomassen afgasset fuldstændig, må man nøjes med mindre. Hvor lang opholdstid man skal kalkulere med, afgøres af økonomiske for-

hold, dvs. værdien af den ekstra gasproduktion afvejes i forhold til den ekstra omkostning ved at lave en større reaktor. I figur 19 er vist den akkumulerede biogasproduktion af forskellige typiske biomasser ved 30 °C.

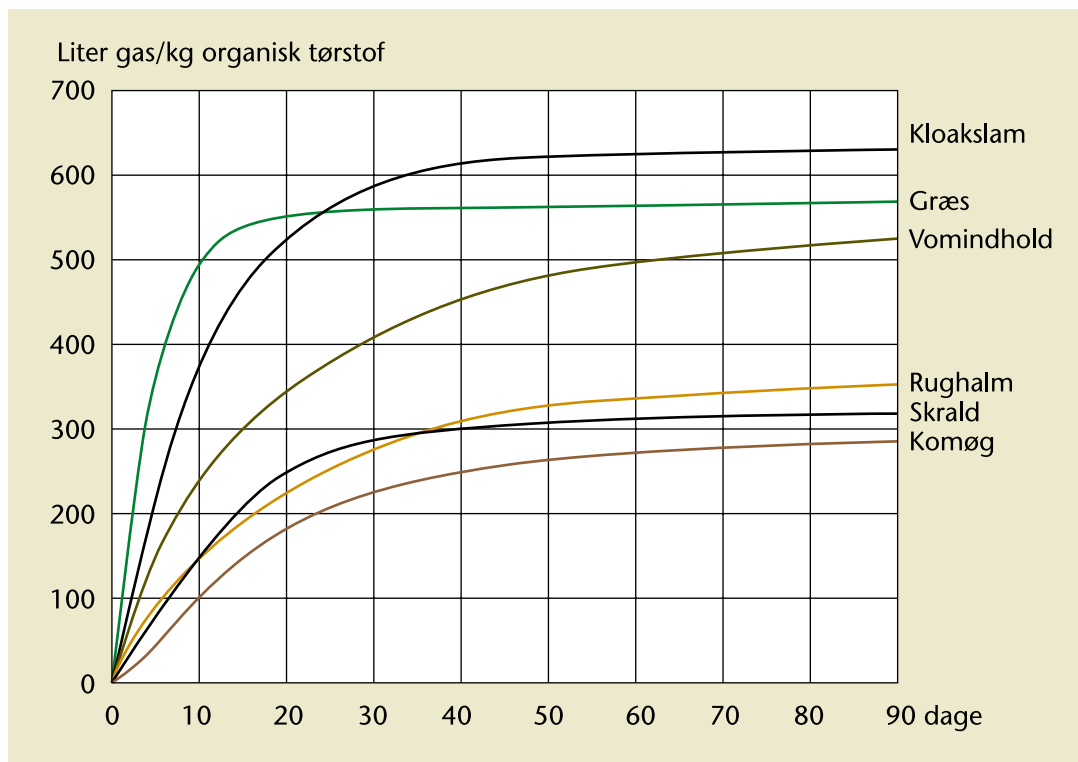
Det ses af figuren for det første, at der er stor forskel på biogaspotentialer af de forskellige biomasser, og at det for nogle kræver meget lang udrådningstid at komme op i nærheden af 100 % af potentialet. For det andet ses det, at nogle biomasser udrådnes betydeligt hurtigere end andre. Det gælder f.eks. græs. Endelig fremgår det, at der går et par dage inden processen rigtigt kommer i gang. Der er med andre ord en kortere eller længere tilvænningsperiode for bakterierne. Ved højere temperaturer vil kurverne typisk være stejle end på ovenstående figur, og man når derfor hurtigere op i nærheden af det totale potentiale.

UDRÅDNING I PRAKSIS

I praksis foregår udrådningen som tidligere nævnt i en kontinuert proces. Det betyder på den ene side at der ikke vil være nogen tilvænningsperiode for bakterierne, hvis biomasse-sammensætningen er konstant. På den anden side betyder daglige ind- og udpumpninger også, at man i en fuldt omrørt reaktor med udpumpningerne udtager lidt biomasse, der kun har været i reaktoren i kort tid.

Figur 18. Laboratorieopstilling til biogasforsøg.



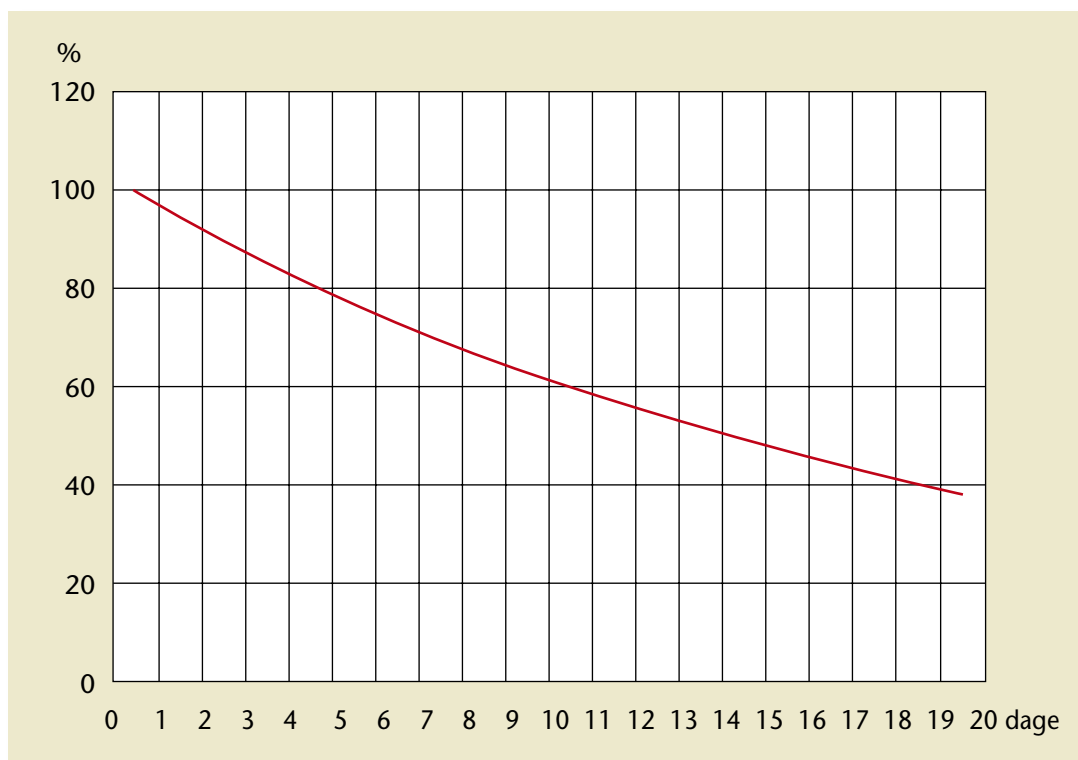


Figur 19. Eksempler på biogasudbytte ved portionsudrådning af forskellige organiske materialer ved 30 °C.

Figur 20 viser hvor stor en del af den biomasse, der indpumpes dag 1, der teoretisk er tilbage efter udpumpninger de følgende dage. Det er antaget, at den gennemsnitlige opholdstid (HRT) er 20 døgn, at reaktoren er fuldt omrørt, og at 1/20-del udskiftes hver dag ved ud- og indpumpning. Som det fremgår, vil ca. 20 % af biomassen indpumpet dag 1 allerede være pumpet ud igen efter ca. 5 dage. Den vil

altså ikke være fuldt udrådnet. Til gengæld vil godt 1/3-del stadig være i reaktoren efter 20 dage.

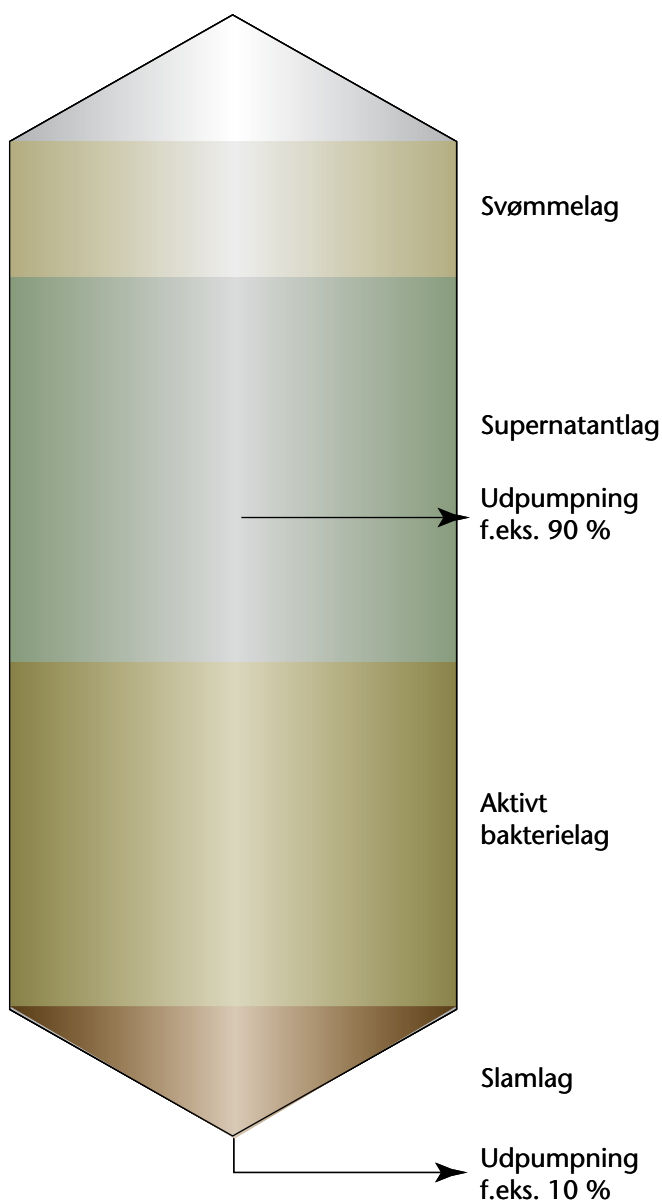
Dette forhold er naturligvis af betydning for hvor stor en del af det teoretisk maksimale gaspotentiale af en given biomasse, man vil kunne nå at få, inden biomassen er pumpet ud igen, og betyder også at gasproduktionen ikke er konstant over tid (se figur 19). For de biomas-



Figur 20. Restmængde af biomasse som er indpumpet dag 1. Den gennemsnitlige opholdstid (HRT) er 20 dage, så 1/20-del udskiftes hver dag ved en ud- og indpumpning.

ser, der udrådnes hurtigt spiller det en mindre rolle end for de biomasser, der kræver længere opholdstid.

Der findes flere metoder til at mindske dette problem og derved opnå en lidt bedre udrådningseffektivitet. I praksis pumpes biomassen fra reaktortanken til en lagertank, der på mange biogasanlæg er overdækket og fungerer som en sekundær reaktor, hvor biomassen holdes i endnu et stykke tid. Afhængigt af biomasse, temperatur og opholdstid, kan man fra denne sekundære reaktor få en ekstra gasproduktion på 5 – 15 % af primærreaktorens produktion. Nogle fabrikanter indarbejder konsekvent en mindre sekundær reaktor, som drives i serie med den primære.



Figur 21. Lagdeling i reaktor under omrørerstop.

Ved at separere den afgassede biomasse, f.eks. med en dekantercentrifuge (se side 32), og recirkulere fiberfraktionen til reaktoren vil man også kunne forlænge nedbrydningstiden for nogle af de langsomt nedbrydelige materialer, f.eks. halm. Om det er en god idé afhænger af forholdet mellem ekstraomkostningen og det ekstra gasudbytte der opnås, samt af om materialet tager plads op for anden biomasse med et endnu større gaspotentiale.

Endelig findes en tredje metode, som bygger på en speciel ind- og udpumpningsstrategi og som udnytter specielle hydrauliske forhold i reaktoren. Standses omrøringen i reaktoren, lagdeler biomassen forholdsvis hurtigt i 4 faser (se figur 21): Øverst et svømmelag af lette stoffer. Dernæst et såkaldt supernatantlag, som fortrinsvis er væske (vand) uden ret meget suspenderet stof. Så et lag af aktive bakterier, og endelig nederst et slamlag af tunge partikler (sand, mineraler etc.). Udpumpes fortrinsvis fra supernatantlaget opnås, at de partikler og stoffer som danner svømmelaget kan holdes i længere tid i reaktoren. Desuden undgår man at pumpe aktive bakterier ud fra bakterielaget og dermed mindske bakterietætheden i reaktoren.

På den måde vil en del af det organiske materiale få en gennemsnitlig længere opholdstid end den gennemsnitlige hydrauliske opholdstid, og man vil derfor kunne opnå et større gasudbytte pr. kg organisk biomasse (VS).

I praksis er det dog ikke helt lige til at styre. For det første skal en del af slammet med mellemrum tages ud for bl.a. at undgå sandophobning. Det kan praktiseres ved at pumpe f.eks. 10 % ud fra bunden og resten fra supernatantlaget. Et større problem er det, at svømmelaget gradvist vil blive tykkere og tykkere og på et tidspunkt blive så kraftigt, at omrørerne ikke længere kan holde biomassen opblandet. Får det lov at udvikle sig, vil processen til sidst gå i stå. Udpumpes med mellemrum fra en fuldt omrørt reaktor, vil det dog være muligt at undgå. Men da man ikke udefra kan se, hvor tykt svømmelaget er blevet og det ligeledes er vanskeligt at måle, er man indtil videre henvist til at prøve sig frem med den givne sammensætning af biomasser. Kun få anlæg er derfor hidtil blevet konstrueret til at benytte princippet.

Biomasse	Typiske gasudbytter		Metan %	VS i procent af TS
	m ³ biogas pr. kg TS	m ³ metan pr. kg VS		
Svinegylle	0,37	0,32	65	75
Kvæggylle	0,24	0,21	65	75
Minkgylle	0,40	0,35	65	75
Dybstrøelse	0,24 – 0,37	0,21 – 0,32	65	75
Hønssemøg	0,40	0,35	65	75
Flotationslam fra rensningsanlæg	0,41 – 0,86	0,36 – 0,75	70	80
Mave-tarm-affald	0,49 – 0,57	0,40 – 0,46	65	80
Primærslam	0,38	0,33	65	75
Biologisk slam	0,11 – 0,23	0,10 – 0,20	65	75
Kildesorteret husholdningsaffald	0,43	0,35	65	80
Majs	0,61	0,37	55	90
Græs	0,57	0,35	55	90

Figur 22. Gasproduktion af forskellige biomasser. TS er tørvægt af biomassen, VS er den organiske biomasse.

BIOGASPOTENTIALER

Som det vil være fremgået af ovenstående, er biogasudbyttet af en given biomasse ikke helt entydigt, men afhænger af bl.a. temperatur og opholdstid i reaktoren. Desuden er det tidligere nævnt at en række mikro- og makronæringsstoffer skal være til stede i den rette mængde. Man kan således ikke udrådne f.eks. rent fedt eller sukker alene.

Det er heller ikke utænkeligt, at der i visse tilfælde kan være tale om synergetiske effekter, når forskellige biomasser blandes.

Dvs. at produktionen er større end summen af enkeltpotentialer. Det modsatte kan også være tilfældet.

Nedenfor er omtalt en række biomasser, som i dag udnyttes i større eller mindre grad. Listen er dog ikke fuldstændig og også andre vil kunne tænkes. Figur 22 viser gasproduktionen af forskellige biomasser.

Husdyrgødning

Det er i landbruget, man finder de største uudnyttede ressourcer til biogasproduktion. I

dag anvendes 4 - 5 % af husdyrgødningen til biogasproduktion, svarende til godt 1,2 mio. m³ pr. år. Det er naturligvis ikke realistisk med en 100 % udnyttelse, men en meget stor del vil med store miljømæssige fordele kunne anvendes til biogasproduktion.

Industriaffald

Nuværende biogasanlæg udrådner foruden husdyrgødning også anseelige mængder organisk industriaffald fra fødevarerindustrier og slagterier o.l. Mængden udgør skønsomt omkring 350.000 tons pr. år, og ordningen er et eksempel på effektiv og bæredygtig genanvendelse af ressourcerne. I dette tilfælde udnyttes organisk stof til energiproduktion, og næringsstofferne bliver samtidig recirkuleret til landbrugsjorden og erstatter handelsgødning. Samtidig er det i høj grad affaldet der giver anlæggene en fornuftig økonomi, dels fordi det ofte har et højt gaspotentiale (højt tørstof- og fedtindhold), og dels fordi anlæggene ofte får betaling for at behandle det.

Den mængde industriaffald der er til rådigg-

hed her i landet, er dog næsten fuldt udnyttet, og der er i dag en vis import af affald til biogasproduktion.

Spildevandsslam

I dag udrådnes en stor mængde spildevandsslam allerede på landets rensningsanlæg. I visse tilfælde vil det dog være muligt at tilføre slammet til biogasanlæggene og derved sikre en endnu bedre udrådning og ikke mindst en recirkulering af næringsstofferne til landbrugsjorden. I den sammenhæng er der dog visse problemer. F.eks. tillader nogle fødevarerindustrier ikke, at produktionsarealer tilføres afgasset biomasse, der indeholder slamprodukter, uanset at biomassen overholder alle miljømæssige krav. Årsagen er ikke logisk eller miljømæssigt begrundet, men bunder udelukkende i en frygt for forbrugerne, som af og til har vist sig pludseligt at reagere irrationelt. Alene begrebet slam har i offentligheden en negativ klang, og så kan miljøkrav o.l. være nok så godt overholdt og anvendelsen bæredygtig. Virksomhederne tør simpelt hen ikke løbe risikoen af frygt for en forbrugerboycot. Ved fremtidige

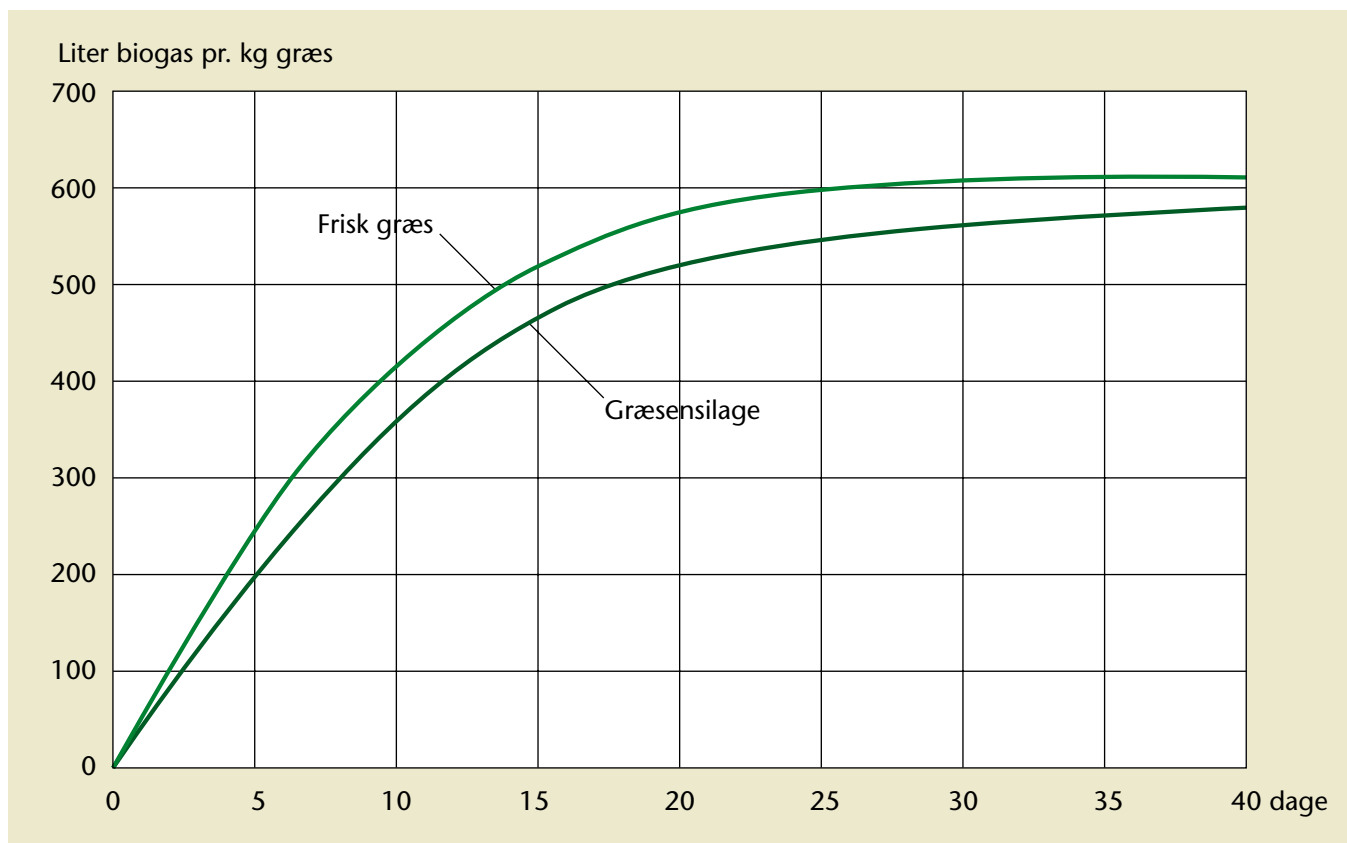
udbygninger af spildevandsrensning bør man i højere grad satse på den anaerobe proces, som kan producere energi, fremfor den aerobe, som forbruger energi.

Husholdningsaffald

Husholdningsaffald er også anvendeligt til biogasproduktion, og har været anvendt på flere anlæg. Enkelte steder sker det stadigvæk, men i de fleste tilfælde er anvendelsen opgivet enten pga. problemer med sorteringen – materialet indeholder for mange urenheder (knive og gaffler, plasticposer o.l.), der giver procesmæssige problemer – eller pga. store lugtmæssige problemer. Anvendelsen må dog stadig anses for at være den mest bæredygtige, igen pga. energiproduktionen og recirkuleringen af næringsstoffer.

Energiafgrøder

I de senere år er anvendelse af energiafgrøder blevet interessant, bl.a. fordi mængderne af organisk industriaffald er begrænsede. Stort set alle dyrkelige afgrødetyper kan anvendes, ligesom afgrøderester som f.eks. roe- eller kar-



Figur 23. Gasudbytte for gæringsprocessen af frisk græs og græsensilage.

toffeltoppe er anvendelige. Kravet er blot, at afgrøden skal være forholdsvis letomsættelig. Dvs. materialet må ikke indeholde for store mængder lignin. Potentialet er næsten så stort, som man ønsker. Det er blot et spørgsmål om, hvor store arealer man vil afsætte til formålet. Et spændende aspekt ved energiafgrøder er at de ofte kan dyrkes på en mere miljøvenlig måde end traditionelle afgrøder. Det gælder specielt flerårige, som f.eks. vedvarende græs, og de vil dermed samtidig kunne anvendes til at mindske problemer med f.eks. udvaskning af kvælstof på miljøfølsomme arealer. Afgrøder kan anvendes i frisk tilstand eller i form af ensilage. Herved kan de eventuelt gemmes til vinterbrug (se figur 23).

Anvendes bælgplanter, f.eks. kløvergræs, lucerne, hestebønne o.l., kan afgrøden desuden anvendes til at skaffe kvælstof til sædskiftet via planternes evne til kvælstoffiksering. Herved kan handelsgødning igen fortrænges, hvilket kan medvirke til yderligere at forbedre energibalancen ved dyrkningen, fordi handelsgødnings-N er stærkt energikrævende at producere.

Energiafgrøder tilbyder dermed, med det rette afgrødevalg, tilrettelæggelse og styring, en mulighed for at få en stor bioenergiproduktion samtidig med en effektiv beskyttelse af miljøet mod udvaskning af kvælstof.

Nogen ser dog et etisk dilemma i, i en sultende Verden, at anvende landbrugsarealer til produktion af afgrøder til energiformål. Med

sådanne tanker bør man dog måske samtidig overveje, hvorvidt det er 'etisk forsvarligt' at producere og spise så store mængder animalske produkter, som vi faktisk gør. Også dette lægger beslag på meget store landbrugsarealer, der alternativt kunne have været anvendt til produktion af menneskeføde. Endelig vil det i givet fald ikke være første gang i historien, at en stor del af landbrugsarealet anvendes til produktion af andet end menneskeføde. For blot 60-70 år siden blev op mod 20 % af arealet anvendt til produktion af foder til landets veludbyggede transportsystem: heste.

NUVÆRENDE PRODUKTION OG DET FREMTIDIGE POTENTIALE

I figur 24 er den nuværende produktion samt det skønnede potentiale af biogas af en række biomasser opstillet.

Den nuværende produktion dækker ca. 5 % af det danske energiforbrug. Ved fuld udnyttelse af ressourcerne kan dækningen komme op på 6 - 7 %. Det fremgår at husdyrgødning udgør den største ressource. Men af økonomiske og miljømæssige grunde kan det måske forventes, at husdyrproduktionen i stigende grad bliver flyttet til udlandet, og at ressourcen dermed i fremtiden bliver mindre. Til gengæld er energiafgrøder en fleksibel ressource, hvis udnyttelse i høj grad vil blive bestemt af miljømæssige og økonomiske forhold i fremtiden.

Enhed, PJ	Nuværende produktion År 2004	Potentiale
Husdyrgødning	0,91	26,0
Spildevandsslam	0,91	4,0
Industriaffald, dansk	0,86	2,5
Industriaffald, importeret	0,65	?
Kød- og benmel	0,0	2,0
Husholdningsaffald	0,03	2,5
Lossepladsgas	0,46	1,0
Energiafgrøder ¹⁾	–	15,9
I alt	3,82	53,0

Figur 24. Biogasproduktion (2004) og det skønnede potentiale for en række biomasser.

¹⁾ Forudsætninger: 5 % af landbrugsarealet, 10 tons tørstof/ha, 90 % VS, 0,35 m³ CH₄ pr. kg VS.

BIOGAS OG MILJØ



Lemvig Biogasanlæg. Anvendelse af biogas pynter på CO₂-regnskabet.

KLIMAFORANDRINGER

Udledning af kuldioxid (CO₂-emission)

Anvendelse af biogas og biomasse i energiforsyningen anses for at være CO₂-neutralt, forstået på den måde, at den mængde CO₂ der frigives ved forbrændingen af biogassen, stammer fra den CO₂ som de planter der udgør biomassen, har optaget under fotosyntesen til opbygningen af organisk stof. På den måde recirkuleres kuldioxid således bare i biosfæren.

Men herudover bidrager selve energiproduktionen positivt til reduktion af emissionen af drivhusgasser, og størrelsen afhænger af hvilket brændsel der fortrænges. Anvendes biogassen f.eks. i stedet for halm, vil der ikke være nogen reduktion af CO₂-emissionen,

fordi halmanvendelsen allerede er CO₂-neutral. Fortrænger biogassen derimod olie, vil det give anledning til et mindre olieforbrug og dermed en reduktion af emissionen. På sammen måde vil reduktionen være en helt tredje, hvis biogassen anvendes til transportformål og fortrænger diesel eller benzin.

På de fleste danske biogASFællesanlæg anvendes biogassen til produktion af el via et motorgeneratoranlæg. Strømmen, som udgør 35 - 40 % af biogassens energiindhold, sælges til elnettet, og her fortrænges strøm, som ellers skulle have været produceret på et af de store kulkraftværker, som er de 'yderste' forsyningsenheder, der kobles til og fra systemet afhængigt af elforbrugets størrelse, se for eksempel: <http://dkkort.elmus.dk/>

Energistyrelsen angiver, at for hver kWh

Figur 25. Maksimal CO₂-fortrængning ved brug af biogas frem for kul til el- og varmeproduktion.

¹⁾ Til overs efter eget forbrug af el og varme.

Maksimal CO ₂ -fortrængning Biogas kraftvarmeproduktion	g CO ₂ pr. m ³ biogas, 65 % metan
Elproduktion ¹⁾ , 2,5 kWh pr. m ³	1.600
Varmeproduktion ¹⁾ , 1,5 kWh pr. m ³	400
I alt	2.000

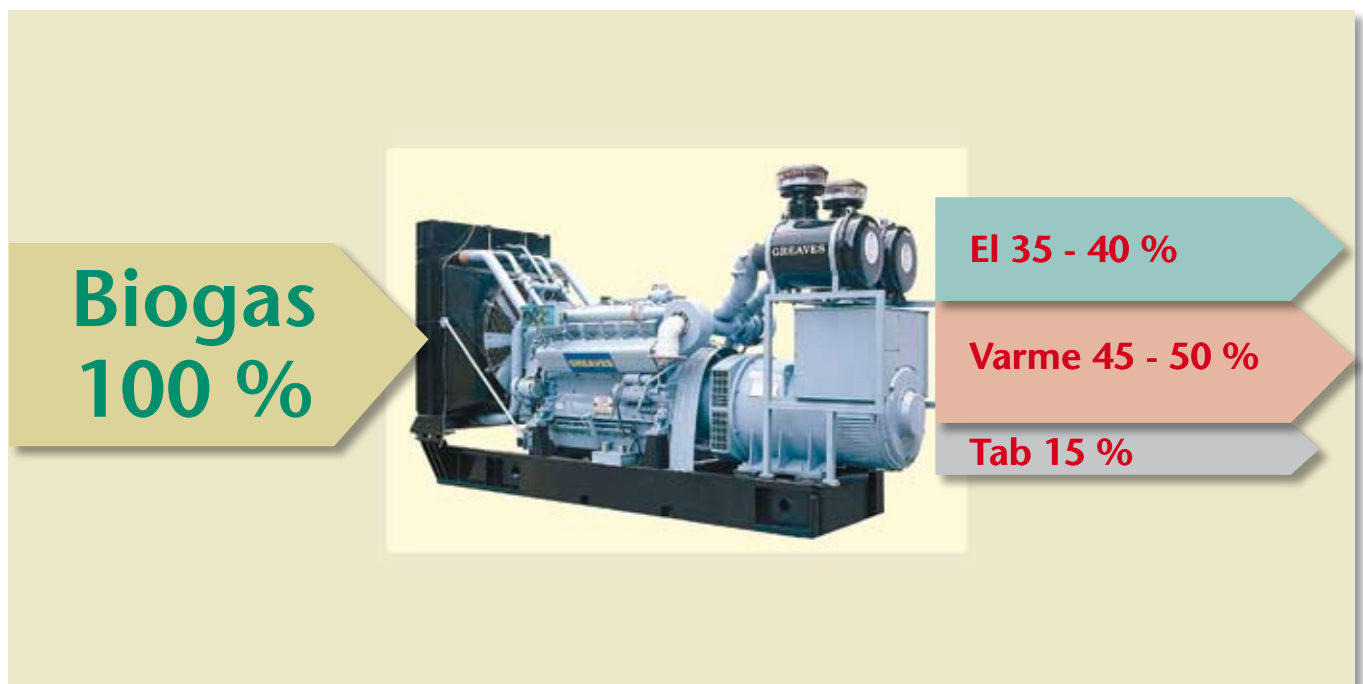
strøm, der produceres fra biomasse – og vind – spares atmosfæren for ca. 640 g CO₂. Desuden medfører produktionen, at miljøet spares for 38 g slagter og aske. Da 1 m³ biogas giver 2,5 kWh el, så bliver det en CO₂-besparelse på 1.600 g pr. m³ biogas (se figur 25).

Ud over elektriciteten producerer motoren varme, der kan opsamles dels fra kølersystemet (lavtemperatur-varme 70 - 80 °C), dels ved køling af røggassen (højtemperatur-varme 150 - 200 °C). 45 - 50 % af biogassens energiindhold kan opsamles som varme (se figur 26).

Heraf skal en del anvendes som procesvarme til opvarmning af biomassen, varmetab og brug

andre steder på anlægget (Varmeforbrug ved opvarmning af biomasse: 1,163 kWh pr. m³ pr. °C + varmetab). Ca. halvdelen vil være til overs til andre opvarmningsformål. Igen: hvis det er fyringsolie der fortrænges, så er reduktionen af emissionen stor, nemlig 266 g CO₂/kWh, dvs. 400 g pr. m³ biogas brugt til varmeproduktion. Derimod er den lille, hvis det er biomasse fra f.eks. halmfyring, der fortrænges (se figur 25).

Vil man have et helt præcist mål for fortrængningen af CO₂ for et givet biogasprojekt, er man nødsaget til at regne tingene igennem i forhold til den givne forsyningssituation og i forhold til hvilke brændsler, der fortrænges.



Figur 26. Effektiviteten af energiproduktion fra biogas. Varmen kan sælges til en varmeforbruger og elektriciteten kan sælges til elnettet.

Udledning af metan og lattergas

Som tidligere nævnt er metan en drivhusgas, der bidrager væsentligt til øgningen af drivhuseffekten, og i øjeblikket stiger koncentrationen af metan i atmosfæren med ca. 1 % om året. Ca. halvdelen af denne stigning skønnes i EU at stamme fra landbruget, og her er husdyrenes fordøjelse og gødningshåndteringen de væsentligste faktorer.

For sammenlignelighedens skyld omregner man metan- og lattergasemissionerne til CO₂-ækvivalenter, når drivhuseffekten skal vurderes, og 1 kg CH₄ svarer til 22 kg CO₂, mens 1 kg N₂O svarer til 310 kg CO₂.

Lattergas (N₂O) har et varmepotentiale der er ca. 310 gange større end CO₂, og der skal derfor ikke så meget ekstra til for at bidrage negativt til drivhuseffekten. I dag stiger koncentrationen af lattergas i atmosfæren med ca. 0,3 % pr. år, og også her tegner landbruget sig for ca. halvdelen. Lattergas dannes primært ved omsætning af kvælstofholdige gødninger under iltfrie forhold i dyrkningsjorden og tilstedeværelse af letomsættelige organiske stoffer. Dannelsen sker bl.a. ved denitrifikation.

Anaerob udrådning af gylle i biogasanlæg

reducerer gødningens indhold af letomsætteligt organisk stof pga. produktionen af biogas. Under den efterfølgende lagring vil der derfor ikke blive dannet så store mængder metan i landmandens lagertank. Det betyder også, at der heller ikke vil blive dannet så meget lattergas i marken, når gyllen senere anvendes som gødning.

SAMLET CO₂-REDUKTIONSPOTENTIALE VED BIOGASPRODUKTION

Modelberegninger viser, at udrådning af husdyrgødning i biogasanlæg reducerer udledningen af drivhusgasser med ca. 0,6 og 0,3 kg CO₂-ækv. pr. kg organisk stof for henholdsvis svine- og kvæggylle. Ved en ligelig blanding af kvæg- og svinegylle med henholdsvis 10 og 5 % tørstof og 75 % VS, svarer det til en reduktion af emissionen på ca. 26 kg CO₂-ækv. pr. tons gylle, eller ca. 1,2 kg CO₂-ækv. pr. m³ produceret biogas. Man kan på den baggrund beregne de teoretiske muligheder for reduktion af udledningen af drivhusgasser i Danmark ved effektiv udnyttelse af biogasteknologi (se figur 27).

Samlet drivhuseffektspotentiale ved biogasproduktion

Biomasse	Mængde (mio. tons/år)	Biogas- Produktion (mio. m ³ /år)	CO ₂ -red. pga. el og varmeprod. - optimal anv. (tons CO ₂ /år)	CH ₄ og N ₂ O-red. som CO ₂ -ækv. (tons CO ₂ /år)	Reduktion I alt CO ₂ -ækv. (tons CO ₂ /år)
Husdyrgødning	15 ¹⁾	330 ³⁾	660.000 ⁴⁾	390.000 ⁵⁾	
Organisk affald	0,5 ²⁾	25 ³⁾	50.000 ⁴⁾	100.000 ⁶⁾	
I alt	15,5	355	710.000	490.000	1.200.000

- Danmarks reduktionsforpligtigelse ifølge Kyotoprotokollen er ca. 25 mio. tons CO₂/år.
- Biogasproduktion på basis af husdyrgødning og affald kan altså bidrage med ca. 5 % heraf.

Figur 27. Årlig potentiel biogasproduktion og CO₂-reduktion på grundlag af husdyrgødning og organisk affald. Muligheden for at anvende energiafgrøder er ikke medtaget.

Forudsætninger:

1) Der er i alt ca. 30 mio. tons husdyrgødning i Danmark. Halvdelen antages anvendt til biogasproduktion

2) I dag udrådnes ca. 350.000 t organisk affald pr. år. Det antages, at 500.000 t fremover anvendes

3) Gasudbytte gylle: 22 m³/t, affald: 50 m³/t

4) CO₂-reduktion pga. fortrængning af fossile brændsler: 2 kg CO₂ pr. m³ biogas (se figur 25)

5) Mindsket emission af metan og lattergas: ca. 26 kg CO₂-ækv./t, eller 1,2 kg CO₂/m³ biogas

Med forbedret stald- og biogasteknologi kan specielt emissionen fra husdyrgødning yderligere reduceres betydeligt, svarende måske til en fordobling

6) Mindsket emission af metan og lattergas: skøn ca. 200 kg CO₂-ækv./t, eller 2 kg CO₂/m³ biogas

NÆRINGSSTOFUDNYTTELSE OG -TAB

I biogasprocessen forsvinder ingen næringsstoffer, da gasproduktionen hovedsageligt består af CO₂ og CH₄. De samme mængder næringsstoffer, som kommer ind med biomasserne findes efterfølgende i den afgassede gylle. Alligevel kan behandlingen og processen have en række positive effekter på næringsstofbalancerne på de tilsluttede husdyrbrug. I figur 28 er angivet eksempler på sammensætningen af forskellige gylletyper.

Fosfor

Typisk har svinebrug mere fosfor i gyllen, end der er behov for til optimal gødsning af afgrøderne i sædskiftet. Det betyder, at svinebrug ofte overgødsker væsentligt med fosfor. Det omvendte er tilfældet for kvægbrug, der derfor ofte må tilføre ekstra fosfor i form af handelsgødning.

I et biogasanlæg blandes en række gødninger og andre biomasser, og landmanden får derfor ikke nødvendigvis de samme mængder næringsstoffer tilbage, som han har leveret. Kvæggylle og organisk affald indeholder ofte mindre fosfor end svinegylle, og svineproducenten vil derfor almindeligvis få mindre fosfor tilbage end han har leveret, mens kvægbruget får mere, hvis gyllemængden er den samme (se figur 29).

På den måde omfordeles næringsstoffer til en vis grad mellem leverandørerne, hvilket bevirker at svinebrugene overgødsker mindre med fosfor og kan spare lidt kalium. Til gengæld kan kvægbrugene spare lidt fosforgødning, men må indkøbe lidt mere kalium.

Desværre er husdyrene i Danmark ikke jævnt fordelt over landet. Kvægbrugene findes typisk i Vestjylland og svinebrugene i Østjylland og på øerne. Derfor er omfordelingen i praksis ikke altid helt så optimal, som den kunne være.

	Tørstof %	Total kvælstof, N kg/t	NH ₄ -N kg/t	Fosfor (P) kg/t	Kalium (K) kg/t	pH
Kvæggylle	6,0	5,0	2,8	0,8	3,5	6,5
Svinegylle	4,0	5,0	3,8	1,0	2,0	7,0
Afgasset gylle (blandet)	2,8	5,0	4,0	0,9	2,75	7,5

Figur 28. Sammensætningen af forskellige gylletyper. Typisk næringsstofindhold i ubehandlet gylle og i afgasset gylle ved ligelig fordeling af kvæg- og svinegylle.

Returneret næringsstofmængde i afgasset gylle i % af leveret mængde (lige dele kvæg- og svinegylle)				
	Kvælstof (N)		Fosfor (P)	Kalium (K)
	Total-N	NH ₄ -N		
Kvægbrug	100	143	113	79
Svinebrug	100	105	90	138

Figur 29. Procentvis mængde næringsstof i returneret, afgasset gylle i forhold til leveret rå gylle.

Kvælstof

Som det fremgår af figur 28 og 29, sker der noget med kvælstoffet i processen. Mens det totale indhold af kvælstof er uændret, ændres forholdet mellem organisk bundet kvælstof og kvælstof på ammonium-form, således at der bliver mere af det plantetilgængelige ammonium. Denne ændring er størst for kvæggylle og endnu større for faste gødninger.

Ændringen er af stor betydning for hvor godt kvælstoffet udnyttes, fordi ammonium-N kan optages direkte af planterne, mens organisk bundet kvælstof først skal frigøres ved nedbrydning af de organiske stoffer, hvilket tager tid. Gødningsvirkningen er derfor højere af afgasset gylle end af rå gylle, og potentielt kan tabet af kvælstof, i form af udvaskning, derfor også blive mindre.

På den anden side øges risikoen for fordampning af ammoniak med et stigende indhold af ammonium-N, og da afgasset gylle ikke naturligt danner svømmelag i lagertanken øges fordampningsrisikoen under lagring. Det er imidlertid et krav, at gylletanke skal have et flydelag, og landmanden må derfor selv etablere det. Det kan f.eks. ske med snittet halm eller leca-nødder. Herved kan fordampningen reduceres fra ca. 20 til få procent af kvælstofindholdet i den oplagrede gylle.

Også under gylleudbringningen øges risikoen for ammoniakfordampning pga. det højere indhold af ammonium-N. Men da afgasset gylle er meget mere tyndtflydende end rå gylle, jf. tørstofindholdet i figur 28, synker gyllen hurtigere i jorden, hvor ammoniakken bindes til vand og partikler. I praksis er fordampningen derfor ikke større fra afgasset gylle end fra

rå gylle, selv ved udlægning oven på jorden med slæbeslanger.

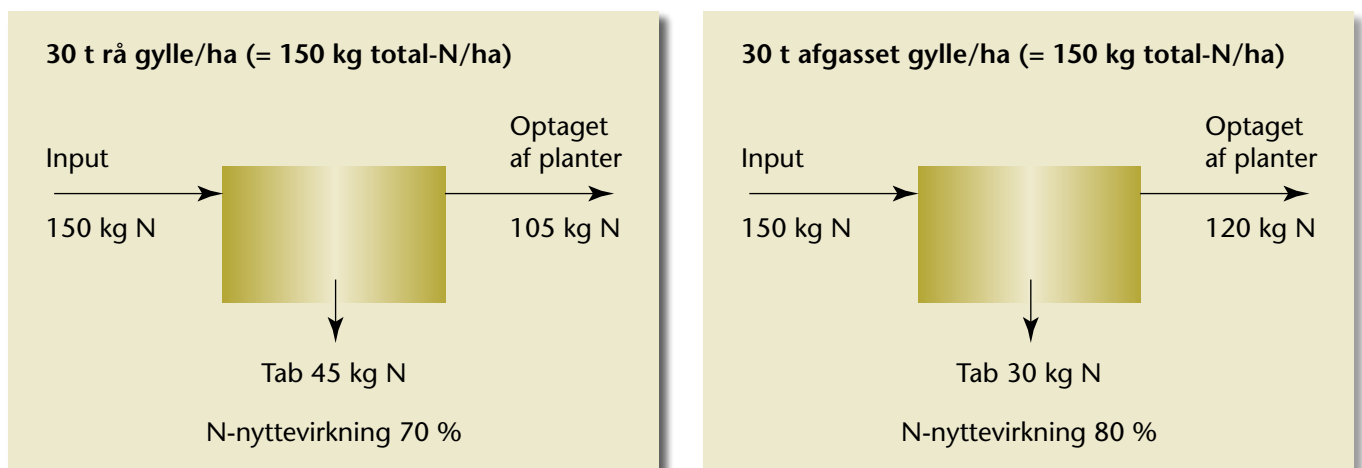
Pga. den højere N-nyttvirkning af afgasset gylle, er der samlet set et stort potentiale for at mindske tabet af kvælstof ved anvendelse på markerne. Potentialet er eksemplificeret ved nedenstående balancer (se figur 30).

I virkeligheden er forholdene mere komplicerede end skitseret her. Bl.a. har forskellige afgrøder forskellige kvælstofnormer (mængde N, der må tilføres), og gødkningen sker ofte med en blanding af gylle og handelsgødning, der har forskellige N-nyttvirkning. En del af 'tabet' vil være organisk bundet kvælstof eller blive ophobet i rodmassen og langsomt frigives de følgende år. Endelig spiller klimatiske forhold (nedbør og fordampning) en rolle for balancen.

LUGT

Som bekendt lugter gylle temmelig kraftigt når den bringes ud på markerne, og lugten skyldes indhold af ikke mindre end 300 forskellige stoffer, som hver især bidrager til det samlede lugtindtryk. Nogle stoffer har en ekstremt lav lugttærskel, dvs. mennesker kan registrere stoffet i uhyre svage koncentrationer, mens andre har en betydeligt højere tærskel.

I biogasprocessen nedbrydes en række af disse stoffer, men til gengæld dannes en række andre. Antallet af lugtenheder (LE) er derfor ofte lige så stor over en afgasset gylle som over en rå gylle. Alligevel er der en markant forskel når gyllen anvendes. Dels er lugten ikke så kraftig og 'stikkende' fra afgasset som fra rå gylle, og dels forsvinder den meget hurtigere fra en gødsket



Figur 30. Simplificeret kvælstofbalance ved anvendelse af rå gylle (½ kvæg, ½ svin) og afgasset gylle.

mark, bl.a. fordi den afgassede gylle pga. det lavere tørstofindhold hurtigere synker i jorden. Reduktion af lugt fra gylleudbringningen er da ofte også en af de væsentligste årsager til at landmændene går ind i biogasprojekter (se figur 31).

Til gengæld kan der være en potentiel risiko for øgede lugtgener omkring selve biogasanlægget. Her samles og behandles store mængder mere eller mindre ildelugtende biomasser, og det er indlysende at der i f.eks. aflæsehallen og fortanke frigives store lugtmængder. Er man omhyggelig med at ventilere og opsamle disse og efterfølgende rense luften i f.eks. biofiltre, kan generne dog i praksis reduceres til et acceptabelt niveau. Alligevel er det protester fra naboer, som frygter lugtgener, der er den største forhindring for etablering af nye biogafællesanlæg. Overordnet betragtet er der dog næppe tvivl om, at biogasanlæg generelt mindsker lugtgener forårsaget af husdyrgødning.

NEDBRYDNING AF MILJØFREMMEDE STOFFER

Miljøfremmede stoffer findes i mange biomasser, bl.a. i gylle og slam, og stammer f.eks. fra rengøringsmidler. Nogle har hormonlignende effekter, og er f.eks. blevet mistænkt for at kunne få fisk til at skifte køn. Mange er organiske stoffer, og de fleste er nedbrydelige i den anaerobe proces. Enkelte er dog svært nedbrydelige, og nedbrydes stort set kun aerobt. Stofferne er ofte bundet til organisk materiale, og nedbrydningen sker fortrinsvis biologisk. Det betyder at nedbrydeligheden almindeligvis stiger med temperaturen. Endelig spiller molekylvægten

ofte en rolle: jo mindre vægt, jo større nedbrydelighed.

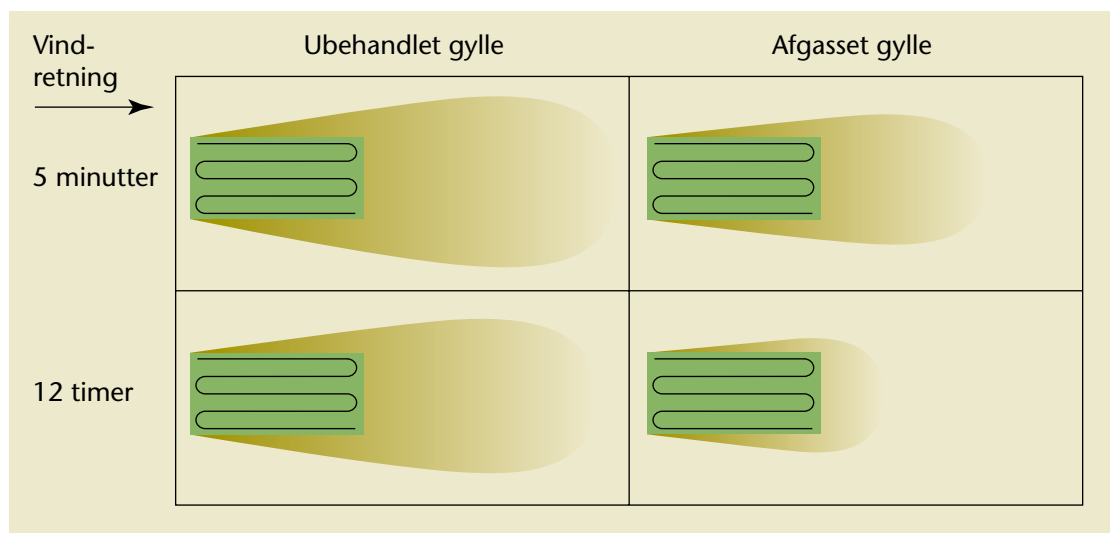
Nedbrydeligheden af miljøfremmede stoffer har hidtil kun været undersøgt på få biogasanlæg, f.eks. Lemvig Biogasanlæg, og her har nedbrydningen tilsyneladende været næsten total, idet der ikke er blevet fundet væsentlige koncentrationer i den afgassede gylle.

Smitstofreduktion og hygiejnisering

Smitstoffer, dvs. bakterier, virus og parasitter, der kan fremkalde sygdom hos mennesker og dyr tilføres biogafællesanlæg med husdyrgødning og affald i en mængde og art svarende til sundhedstilstanden i husdyrbestanden og befolkningen.

Indholdet af fækale streptokokker, som i sig selv er uskadelige, er altid meget høj i rågylle, og antallet (FS-tallet) er et indirekte mål for mængden af andre og evt. skadelige bakterier, f.eks. salmonella. Målinger fra biogafællesanlæg viser at antallet af streptokokker kan være op mod 10 mio. pr. gram i rågylle, og være reduceret til < 5 pr. gram (= 0) efter afgangningen. Det samme gælder for de fleste andre bakterier. Hygiejniseringen er dermed meget effektiv og nærmest fuldstændig. Også husdyrparasitter i gyllen slås i stort omfang ihjel i et traditionelt anlæg. Erfaringen viser da også at sundhedstilstanden i besætninger tilsluttet biogasanlæg ofte er bedre end normalt.

Behandlingen af gylle i biogasanlæg sikrer endelig at ukrudtsfrøs spireevne ødelægges. Resultatet er at ukrudtstrykket i marken reduceres og at mængden af ukrudtsmidler vil kunne begrænses.



Figur 31. Lugtens udbredelse efter gyllespredning efter henholdsvis 5 min. og 12 timer for ubehandlet og afgasset gylle.

SEPARATION AF AFGASSET BIOMASSE

Mange har set separation af gylle – rå eller afgasset – som et brugbart instrument til løsning af husdyrbrugets problemer med overgødskning og for store tab af næringsstoffer til omgivelserne.

Filosofien er, at man ved at adskille næringsstofferne – helt eller delvist – får lettere ved at komme af med et overskud.

Lavteknologisk separation

Med en lavteknologisk separering af afgasset gylle, f.eks. vha. en dekantercentrifuge, vil tørstof og næringsstoffer typisk blive fordelt som skitseret i figur 32 (i eksemplet er taget udgangspunkt i en tynd afgasset gylle, men for-

holdet mellem stofferne vil være nogenlunde den samme med et tykkere udgangspunkt):

Fiberfraktionen indeholder hovedparten af tørstoffet, og udgøres af unedbrydelige organiske stoffer (specielt lignin), mineraler, sand og bakterieceller. Fraktionen har et tørstofindhold omkring 30 %, struktur som en fin kompost, og den skal spredes med gødningsspreder. Den er meget velegnet som jordforbedringsmiddel, fordi den indeholder humusopbyggende stoffer. Fosforindholdet er ligeledes højt, og fraktionen er derfor også velegnet til opgødsning af arealer med fosformangel. Til gengæld er kvælstofindholdet forholdsvis lavt, og hovedparten er organisk bundet kvælstof med en lav kvælstofvirkning.

Fiberfraktionen er ikke lagerstabil, og vil ved henlæggelse gå i spontan kompostering. Der udvikles varme i bunken, og organisk bundet

Afgasset biomasse			kg	kg/t
Mængde			1000	–
Tørstof, 2,8 %			28	28
Vand			972	972
Total-N			5	5
NH ₄ -N			4	4
Fosfor, P			0,9	0,9
Kalium, K			2,8	2,8

Separation

Fiberfraktion			kg	kg/t
Mængde			80	–
Tørstof, 30 %			24	300
Vand			56	700
Total-N			1,25	15,6
NH ₄ -N			0,3	3,8
Fosfor, P			0,7	8,8
Kalium, K			0,2	2,5

Væskefraktion			kg	kg/t
Mængde			920	–
Tørstof, 0,4 %			4	4,3
Vand			916	995
Total-N			3,75	4,1
NH ₄ -N			3,7	4,0
Fosfor, P			0,2	0,2
Kalium, K			2,6	2,8

Figur 32. Lavteknologisk separation med dekantercentrifuge. Den afgassede gylle deles ved centrifugering i to fraktioner: En fiberfraktion med 30 % tørstof, der er humusholdig og et godt jordforbedringsmiddel. Desuden indeholder fraktionen hovedparten af fosforindholdet. Væskefraktionen indeholder kun 0,4 % tørstof, men det meste af ammonium-kvælstofet. Separationen giver mulighed for mere præcis og effektiv anvendelse af gyllen.

N bliver mineraliseret og i et vist omfang tabt ved ammoniakfordampning. Det stiller selvsagt specielle krav til opbevaringen og evt. transport af fraktionen.

Væskefraktionen består næsten kun af vand og fremtræder som en meget tynd gylle. Den indeholder hovedparten af ammonium-kvælstoffet, og er dermed en hurtigtvirkende gødning, der skal spredes med slæbeslanger eller nedfældes. Under gunstige forhold kan der opnås lige så høj N-nyttevirkning som med handelsgødning, dvs. 90 - 95 %.

En fordel for landmanden er, at hvor han normalt kun må sprede 140 kg N pr. ha med husdyrgødning, kan han ved anvendelse af væskefraktionen fuldgødske. Dvs. han i stedet må sprede op til 168 kg N pr. ha. Med et indhold på 4,1 kg N/t kan han således komme af med ca. 40 t/ha, hvor han normalt med usepareret gylle må nøjes med ca. 28 t/ha (5 kg N/t). Det sparer ham for noget transport og desuden evt. for noget handelsgødning. Om det er tilstrækkeligt til at opveje ekstraomkostningerne er derimod et andet spørgsmål.

Højteknologisk separation

Det er muligt at separere væskefraktionen yderligere således at næringsstofferne opkoncentreres endnu mere, og der findes flere højteknologiske metoder til dette.

En simpel metode er inddampning, hvor vandet under varmetilførsel afdampes. Ved total inddampning ender man med en siruplignende masse, som indeholder de resterende næringsstoffer og mineraler. Processen kræver forsuring ved tilsætning af syre eller videre behandling af vandfraktionen for at tilbageholde ammoniak. Fordelen er at man slipper af med en masse vand, som det er dyrt at køre rundt med. Ulempen er at processen er meget energi-krævende, og at udstyret naturligvis heller ikke er gratis.

Andre metoder går ud på f.eks. at tage kvælstoffet ud af væsken. Det kan ske ved såkaldt ammoniakstripping. Ved tilsætning af en base, f.eks. natriumhydroxid, NaOH, forskydes ligevægten $\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$ mod højre, og opvarmes biomassen herefter, fordampes ammoniakken sammen med noget af vandet. Efterfølgende kondenseres vand/ammoniak, og man får en vandig opløsning med et højt indhold af kvælstof. Kvælstoffet vil ved anvendelse dog være stærkt flygtig og let fordampe, derfor må man 'forsure' det ved tilsætning af syre.

Processen er, som antydnet, forholdsvis kompliceret og dermed også temmelig bekostelig, og tilbage står man med en væskefraktion som stort set indeholder hele kaliummængden. Denne fraktion kan udvandes med vandingsanlæg. Men skal kaliumindholdet udnyttes optimalt, kan man ikke udvande hele mængden på et begrænset areal, selvom man godt kan tillade sig at gødske med kalium for flere år ad gangen. Det giver derfor naturligvis en besparelse på transporten.

Alternativt må man også pille kalium ud af væsken, hvilket kan ske ved hjælp af diverse membranseparationsmetoder o.l.

Som det er antydnet ovenfor er separation af gylle og afgasset gylle temmelig bekostelig, i hvert fald hvad angår højteknologisk separation. Inden man kaster sig over metoderne, bør man derfor nøje overveje, hvad formålet med det er og ikke mindst prisen. F.eks. er omkostningen alene ved lavteknologisk separation, som altid går forud for en evt. højteknologisk, ca. 20 kr./t (10 kr. pr. t i driftsudgifter og 10 kr./t til forrentning og afdrag på lån til udstyret). Nogenlunde det samme koster almindelig transport af gylle med gylletankbil inden for en rimelig afstand, 10 - 15 km. For at separation skal kunne svare sig skal afstanden, som gødningsstofferne skal transporteres, med andre ord være temmelig stor.

STIKORDSREGISTER

A	
Aerob nedbrydning	8, 34
Affald	6, 7, 23, 24, 28, 29, 31, 34
Anaerob nedbrydning	4, 8, 28, 34
B	
Biogas	4-7, 15-17, 19, 23-28
Biogas, brændværdi	4, 5, 19
Biogas, sammensætning af	4, 22
Biogasanlæg	4, 6, 7, 11, 12, 15, 19, 22, 23, 28, 29, 31
BiogASFællesanlæg	7, 15, 26, 31, 34
Biogaspotentiale	20, 34
Biogasproduktion	6, 7, 13, 20, 23-25, 28
Biogasudbytte, se også gasudbytte	19, 21, 23
Biomasse	7, 8, 10-13, 15-29, 31-33
Brændværdi	4, 5, 19
C	
C/N-forhold	12
Cellulose	4, 9, 10, 19
Chemical Oxygen Demand (COD)	12, 15, 19
CO ₂ -fortrængning	27, 28
CO ₂ -neutral	26
CO ₂ -ækvivalent	28
Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR)	12, 15
D	
Drivhuseffekt	6, 28
Drøvtygger	5, 6
E	
Effektivitet, se også årsvirkningsgrad	18, 22, 27
Efterlagertank	15, 17
Emission, se også udledning	6, 26-28
Energiafgrøde	24, 25, 28
Energiproduktion	6, 18, 23-27
F	
Fermentation, se også syredannelse	8, 10
Fiberfraktion	22, 32
Flydelag, se også svømmelag	30
Forsuring, se også 'løber sur'	13
Fortank	15, 16, 31
Fosfor	12, 29, 32
G	
Gasproduktion, se også biogasproduktion	17, 20, 22, 23
Gasudbytte, se også biogasudbytte	11, 19, 20, 22, 24, 28
Giftvirkning	14
Gylle	7, 13, 16, 28-33
Gødning	7, 16, 17, 28, 33
H	
Hemicellulose	4, 9, 10, 19
Hydraulic Retention Time, se også opholdstid	19
Hydrolyse	8-10
Hæmning	10, 12-14
K	
Kortkædede fedtsyrer (VFA)	10
Kvælstof	4, 10, 12, 25, 28-30, 32, 33
L	
Lagertank	15, 17, 22, 28, 30
Langkædede fedtsyrer (LCFA)	8, 10
Lignin	9-11, 19, 25, 32
Lugt, reduktion af	31
Løber sur, se også forsuring	10

M		T	
Makronæringsstoffer	12, 23	Termofil	11, 13, 16
Mesofil	11, 13, 16	Tundra	6
Metan	4-6, 8, 10-12, 14, 17, 19, 20, 23, 27, 28	Tørstofindhold	11, 15, 19, 21, 23, 25, 28-32
Metanbakterier	5, 10-12	U	
Metandannelse, se også metanogenese	8, 10, 14	Udledning, se også emission	26, 28
Metanogenese, se også metandannelse	10	V	
Metanprocent	4	Væskefraktion	32, 33
Mikronæringsstoffer	12, 13	Å	
Miljøfremmede stoffer	31	Årsvirkningsgrad, se også effektivitet	18
O			
Opholdstid (HRT), se også Hydraulic Retention Time	15, 17, 19-23		
Ozonlag	6		
P			
Psykrofil	11		
R			
Reaktortank	15-17, 22		
Rensningsanlæg	6, 7, 16, 23, 24		
S			
Separation	32, 33		
Septiktank	6		
Slam	6, 7, 15, 21-25, 31		
Smitstoffer	31		
STUB-program	7		
Supernatantlag	22		
Svømmelag, se også flydelag	12, 16, 22, 30		
Syredannelse, se også fermentation	8, 10		

Dette hæfte er udgivet som et gratis undervisningsmateriale af Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet. Hæftet giver en bred almen indføring i problematikken vedrørende biogas, og henvender sig derfor både til fagfolk og interesserede lægfolk. Størstedelen af hæftet er skrevet, så det kan læses med udbytte af interesserede uden særlige forkundskaber, og vil også kunne bruges på gymnasialt niveau, fortrinsvis i biologi og kemi.

Tak til Anders Peter Jensen og Adris Georgis Shlimon, Xergi A/S, Lars Ellegård, BWSC og Lars Kristensen, Lemvig Biogas, for omhyggelig faglig korrektur og gode råd.

Denne 2. udgave af hæftet er opdateret og trykt med støtte fra Vækstforum for Region Midtjylland.

