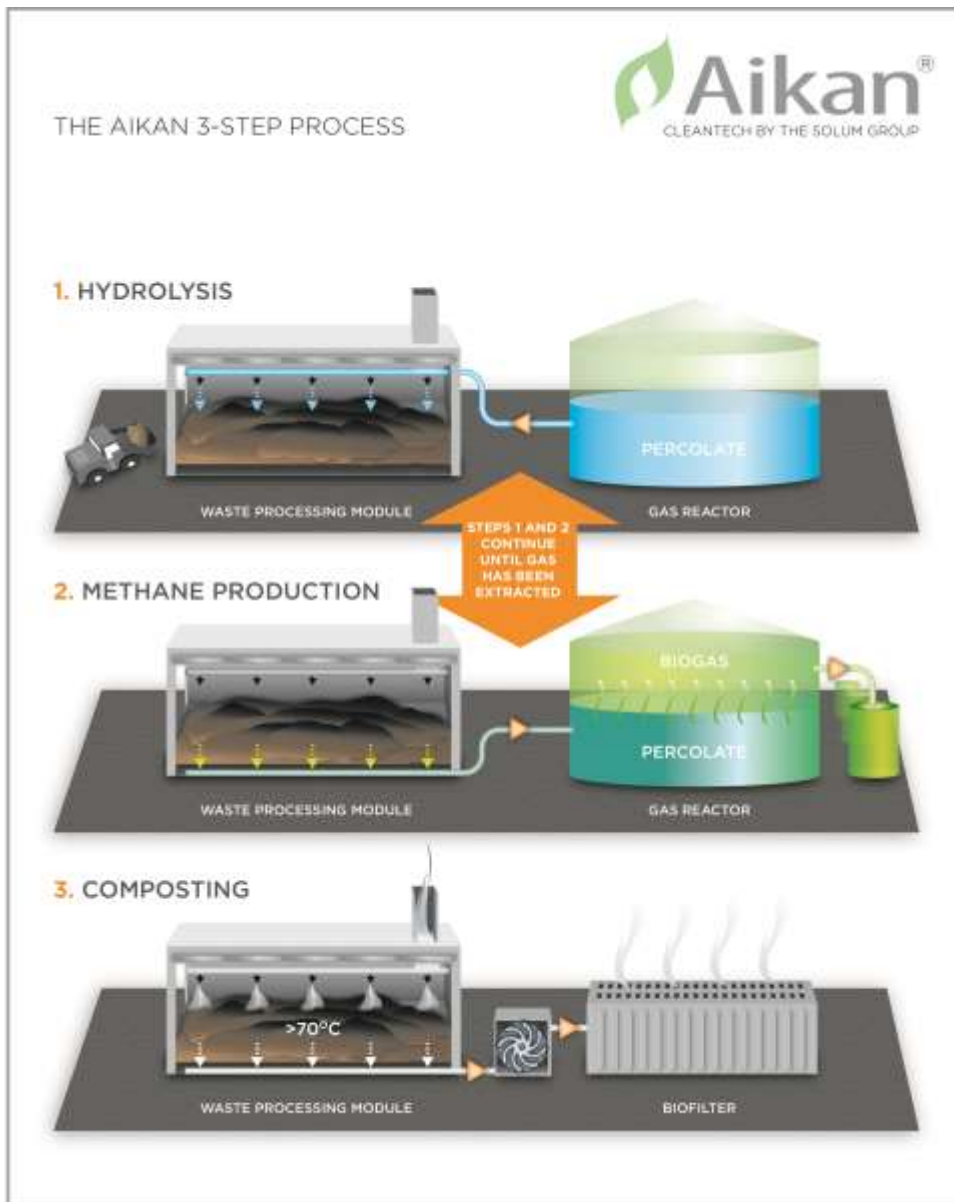


# Økologisk gødning baseret på fast organisk materiale behandlet i biogasanlæg

Demonstrationsforsøg udført med Aikan-teknologien



Januar 2015

Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri

Den Europæiske Landbrugsfond for Udvikling af Landdistrikterne

Naturerhverv.dk

Danmark og Europa investerer i landdistrikterne

Se 'European Agricultural Fund for Rural Development' (EAFRD)

# Indholdsfortegnelse

<b>Om rapporten</b> .....	3
<b>Sammendrag</b> .....	3
<b>1. Indledning</b> .....	4
<b>2. Metanpotentiale</b> .....	4
<b>2.1. Metodebeskrivelse</b> .....	4
<b>2.2. Resultater</b> .....	5
<b>3. Biogasproduktion i fuld skala</b> .....	5
<b>3.1. Beskrivelse af Aikan-teknologien</b> .....	6
<b>3.2. Forsøgsbeskrivelser</b> .....	9
<b>3.2.1. Dybstrøelse (Forsøg 1)</b> .....	9
<b>3.2.2. Dybstrøelse, gyllefibre og græs/urter (Forsøg 2)</b> .....	10
<b>3.2.3. Hestemøg (Forsøg 3)</b> .....	11
<b>3.2.4. Halm + kløver (Forsøg 4)</b> .....	11
<b>3.2.5. Græs/urter (Forsøg 5)</b> .....	13
<b>3.3. Resultater</b> .....	15
<b>3.3.1. Tørstof</b> .....	15
<b>3.3.2. Produktion af biogas og metan</b> .....	15
<b>3.3.3. pH i perkolat og reaktorvæske</b> .....	17
<b>3.3.4. Temperatur</b> .....	18
<b>3.3.5. Hydrolysen</b> .....	19
<b>4. Gødningsprodukter og næringsstoffer</b> .....	20
<b>4.1. Gødningsprodukter</b> .....	20
<b>4.2. Næringsstofanalyser</b> .....	21
<b>5. Udviklingspotentiale og perspektivering</b> .....	22

## Om rapporten

Rapporten er udarbejdet af Aikan A/S, som en del af projektet "Økologisk gødning baseret på fast organisk materiale behandlet i biogasanlæg". Projektet er finansieret af EU's landdistriktsmidler og Fonden for Økologisk Landbrug.

Rapporten er skrevet af Peter Brønnum og Morten Brøgger Kristensen.

## Sammendrag

Aikan-teknologien er en bioafgasningsproces, der behandler og omdanner faste organiske masser, som kildesorteret organisk dagrenovation (KOD), rester fra fødevarerproduktion, spildevandsslam, restbiomasser fra landbruget, til biogas og kompost. Teknologien er robust og anvendes i udstrakt grad til affaldstyper, som konventionelle biogasanlæg ikke kan håndtere.

Solum Gruppen driver et Aikan-anlæg på virksomheden BioVækst ved Audebo nær Holbæk. Anlægget behandler kildesorteret organisk dagrenovation (KOD) og andet organisk affald.

I projektet er der gennemført en række undersøgelser og demonstrationsforsøg med økologiske restbiomasser. Forsøgene er udført i fuld skala på Aikan forsøgsanlægget på BioVækst. Til forsøgene er anvendt restbiomasser fra nærliggende landbrug: dybstrøelse fra kvæg, separeret svinegylle (gyllefibre), græs + urter fra ekstensive engarealer, hestemøg samt halm høstet og snittet sammen med kløverudlæg.

I Aikans laboratorium er der desuden udført undersøgelser af metanpotentiale, samt pH og opløst organisk stof i perkolat og reaktorvæske. Analyser af næringsstofindholdet i biomasser og kompost er udført af et eksternt laboratorium.

Resultaterne viser, at der med den anvendte teknologi vil kunne opnås metanudbytter på over 50 procent af metanpotentialet i de afprøvede restbiomasser, afhængigt af udrådningstid og temperatur.

Den udrådnede masse kan udbringes som gødning direkte eller efter kompostering. Resultaterne viser, at der vil være et vist tab af næringsstoffer. Resultaterne er ikke på dette område entydige, men der er en relevant forklaringsmodel, som skal undersøges nærmere.

Samlet set viser resultaterne, at der er gode muligheder for at bidrage positivt til økologisk jordbrug, hvis de belyste usikkerheder kan elimineres.

## 1. Indledning

Aikan-teknologien er en bioafgasningsproces, der behandler og omdanner faste organiske masser, som kildesorteret organisk dagrenovation (KOD), rester fra fødevareproduktion, spildevandsslam, restbiomasser fra landbruget, til biogas og kompost. Teknologien er robust og anvendes i udstrakt grad til affaldstyper, som konventionelle biogasanlæg ikke kan håndtere.

Solum Gruppen driver et Aikan-anlæg på virksomheden BioVækst ved Audebo nær Holbæk. Anlægget behandler nu årligt godt 20.000 tons kildesorteret organisk dagrenovation (KOD) og andet organisk affald.

Det var derfor nærliggende at anvende Aikan teknologien i dette projekt, fordi den er udviklet til og afprøvet på faste biomasser i mere end 10 år.

I projektet er der gennemført en række undersøgelser og demonstrationsforsøg med økologiske restbiomasser. Demonstrationsforsøgene er udført i fuld skala på Aikan forsøgsanlægget på BioVækst. Til forsøgene er anvendt restbiomasser fra nærliggende landbrug. Der er anvendt dybstrøelse fra kvæg, separeret gylle (gyllefibre) fra slagtesvin, græs + urter fra ekstensive engarealer, hestemøg samt halm høstet og snittet sammen med kløverudlæg. Masserne græs + urter og halm + kløver blev ensileret før afgangning.

I Aikans laboratorium er der desuden udført undersøgelser af metanpotentiale i de ovenstående biomasser, samt pH og opløst organisk stof i perkolat og reaktorvæske. Målinger af næringsstofindholdet i biomasser og kompost er udført af et eksternt laboratorium.

## 2. Metanpotentiale

Metanpotentialet er et mål for metanproduktionen efter fuldstændig udrådning af et substrat. Sammenligning af metanpotentialet med det reelle metanudbytte fra biogasproduktion i fuld skala giver en indikation af, hvor effektiv den anvendte bioafgasningsproces er.

### 2.1. Metodebeskrivelse

Prøver blev udrådnede ved 37 °C i inokulerede reaktorflasker efter protokollen for AMPTS (Automatic Methane Potential Test System, produceret af Bioprocess Control) i mindst 30 døgn (standard) og i flere tilfælde op til 90 døgn. Som substrat til udrådningen blev prøver af dybstrøelse, græsensilage, svinegylle og halm + kløver neddelte (< 2 mm) efter tørring ved 55 °C i 72 timer. Hvert substrat blev udrådnede med 3 gentagelser. Inoculum var reaktorvæske fra biogasproduktion på Aikan-anlægget. Metanproduktionen blev registreret automatisk på pc.

Metanpotentialet angives normalt som *liter metan pr. kg organisk tørstof* (organisk tørstof = volatile solids, VS) efter 30 dages udrådning. Organisk tørstof er det materiale der kan omdannes til biogas. I denne rapport er anvendt den ækvivalente enhed *kubikmeter metan per ton VS*, da den er mere relevant ved sammenligning med metanudbytter i forsøgene i fuld skala.

Gasvolumenerne er normaliseret, dvs. omregnet til volumen (Nm<sup>3</sup>) ved standardbetingelser 0 °C, 1 atm. tryk, således at resultater bliver sammenlignelige.

Det var derfor nødvendigt at bestemme biomassens (substratets) indhold af tørstof og organisk tørstof. Indholdet af totalt tørstof (TS) i biomasserne blev bestemt efter tørring af en prøve ved 105 °C i 24 timer. Tørstofindholdet blev beregnet som procent af friskvægten TS(FV). Askeindholdet blev bestemt ved efterfølgende opvarmning (afbrænding) af tørstofprøven i muffelovn ved 550 °C i 2 timer. Indholdet af organisk tørstof blev derefter beregnet som forskellen mellem vægten af tørstof og vægten af aske og kan angives som procentdel af enten friskvægt, VS(FV) eller tørstof, VS(TS). Alle tørstofanalyser blev udført med tre gentagelser.

## 2.2. Resultater

De metanpotentialer, der blev målt i Aikans laboratorium, er vist i Tabel 1. Resultaterne er i god overensstemmelse med de værdier, som kendes fra litteraturen, måske med undtagelse af værdierne for enggræs/urter og kulturgræs, som her er lidt højere end normalt.

**Tabel 1.** Metanpotentiale fra forskellige biomasser efter 30 døgns udrådning. Metanpotentialet er angivet som Nm<sup>3</sup> pr. ton organisk tørstof.

Biomasse	Metanpotentiale, Nm <sup>3</sup> /ton VS
Dybstrøelse	202
Enggræs + urter (ensilage)	367
Kulturgræs (ensilage)	447
Gyllefibre (slagtesvin)	185
Hestemøg	81
Halm + kløver (ensilage)	98
<b>Dybstrøelse + gyllefibre + enggræs/urter (49:37:14)*</b>	<b>237</b>

\*metanpotentialet er beregnet ud fra forholdet mellem de mængder, som anvendes i demonstrationsforsøg 2; se dette.

Den relativt store forskel i metanpotentiale i kulturgræs og enggræs kan skyldes, at kulturgræsset er forædlet mod høj fordøjelighed. Metanpotentialet i hestemøg er ret lavt i forhold til dybstrøelse, som hestemøg ellers bedst kan sammenlignes med her. Det lave potentiale skyldes muligvis, at hestemøget var ret omsat allerede, da det blev leveret (se evt. bemærkningerne om hydrolyse i afsnit 3.3.5.).

Resultaterne af tørstofanalyser fremgår af kapitel 3, Tabel 4 i afsnit 3.3.1.

## 3. Biogasproduktion i fuld skala

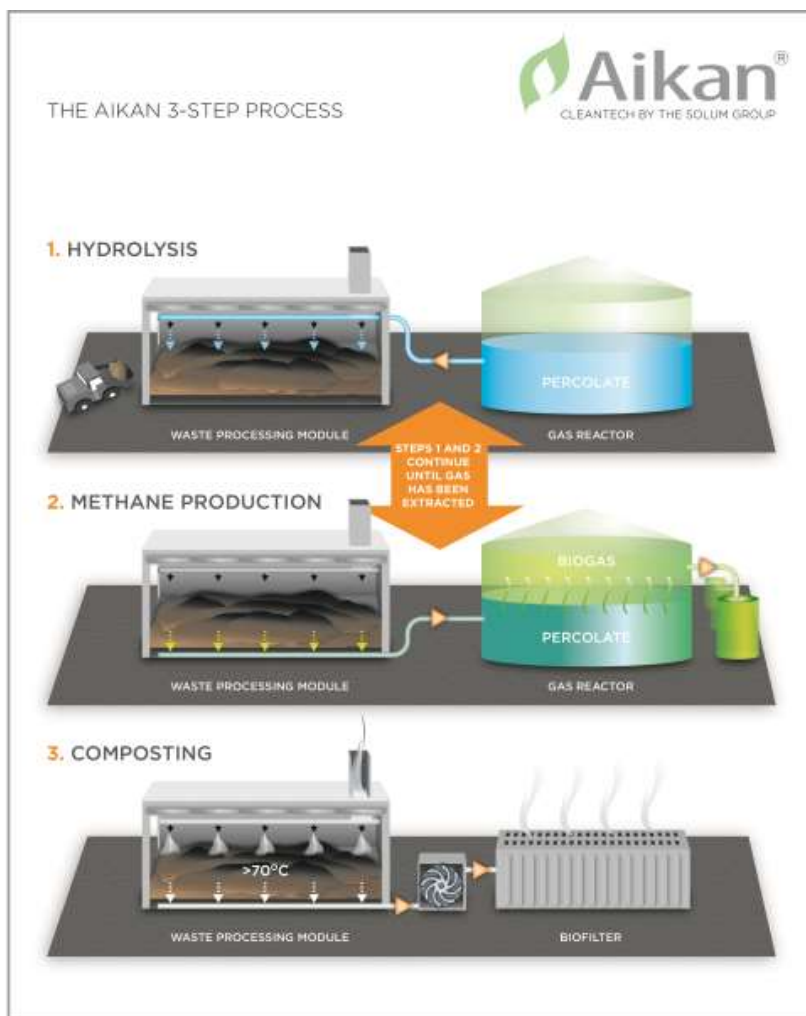
Demonstrationsforsøgene i fuld skala blev udført med Aikan-teknologien på BioVækst anlæg ved Audebo nær Holbæk. Biomasserne blev leveret fra landbrug i området. Biomasserne og de enkelte forsøg er beskrevet længere fremme.

### 3.1. Beskrivelse af Aikan-teknologien

Aikan processen er 2-faset, dvs. at den ene del af processen sker i fast materiale, mens den anden del sker i væske: nedbrydningen af det faste stof (hydrolyse) foregår adskilt fra biogasdannelsen (metanogenese), der sker i reaktorvæsken. Processen er opdelt i tre trin: 1) hydrolyse, 2) metanogenese og 3) kompostering (se Figur 1).

Det organiske materiale blandes i en landbrugsfoderblander i ca. 5 min. med et inert materiale bestående af knuste grene og rødder, for at skabe en åben struktur i massen. Derefter læsses den ind i procesmodulerne (Figur 2), der lukkes med en gastæt port og processen starter.

Det *første trin* sker i procesmodulet (Figur 1), hvor den lettest nedbrydelige og energirige del af massen opløses og frigives (hydrolyse). Massen overvandes periodisk via sprinklere med afgasset væske fra reaktortanken (ca. 30 - 40 m<sup>3</sup> pr. døgn) og det opløste organiske materiale vaskes ud ved perkolering. Væsken fra reaktortanken har en temperatur på ca. 35 °C, når den pumpes ind i procesmodulet. Temperaturen i procesmodulet varierede i disse forsøg lidt med årstiden afhængigt af, hvor effektivt modulet var varmeisoleret. På nye anlæg isoleres procesmodulerne altid for at mindske denne variation.



**Figur 1.** Aikan teknologien og dens tre trin: hydrolyse (1.), metanproduktion (2.) og kompostering (3.).



**Figur 2.** Procesmodul fyldt med blanding af biomasse og strukturmateriale.

Perkolatet, med energirigt opløst stof (fedtsyrer, alkoholer, sukkerforbindelser), drænes ud i bunden af modulet og pumpes tilbage til reaktortanken, hvor det *andet trin*, biogasdannelsen, foregår (metanogenese). Da det er et lukket system, cirkulerer væsken således mellem procesmodul og reaktortank som hhv. beriget og afgasset (Figur 1). Temperaturen i reaktortanken på BioVækst er ca. 38 °C (mesofil proces), men det er naturligvis muligt at vælge et termofilt regime i stedet.

Opløste uorganiske plantenæringsstoffer, som N, P og K, recirkulerer ligeledes mellem modul og reaktor. Derved tilbageføres udvaskede næringsstoffer til det faste materiale, der senere komposteres.

Biogassen ledes fra reaktortanken til en gasmotor/generator, hvor gassen nyttiggøres til el- og varmeproduktion.

Efter 1-2 uger stoppes afdræningen og massen i procesmodulet oversvømmes med reaktorvæske i ca. 150 cm. højde (dette er ikke vist på illustrationen i Figur 1). Det medfører, at der også dannes biogas i procesmodulet. Denne gas sendes til reaktortanken, hvor den blandes med gassen fra denne inden den sendes til gasmotoren.

For KOD stoppes bioafgasingen normalt efter 3 uger (inkl. oversvømmelse), når der registreres et begyndende fald i biogasproduktionen. Men landbrugsbiomasserne har et stort indhold af lignin

(træstof) fra især halm, som nedsætter hydrolysehastigheden betydelig. Overvandingen i procesmodulet blev derfor forlænget til 6 - 9 uger, hvorefter det blev afdrænet.

Det *tredje trin*, hvor den svært nedbrydelige rest komposteres, sker ved at suge luft ned gennem massen og ud af drænkanalerne i bunden af procesmodulet (Figur 1). Komposteringen foregår i et lukket rum, hvor den mekaniske ventilation hele tiden sørger for aerobe forhold i massen. Temperaturen stiger til ca. 70 °C i adskillige timer, hvorved komposten hygiejniseres, dvs. sygdomskim og ukrudtsfrø dræbes.

Efter 7 dage stikkes massen om, ved at fylde den ind i et andet procesmodul, lukke porten og fortsætte beluftsproceduren i yderligere 4 uger. Derefter tømmes modulet og kompostmassen lægges til eftermodning udendørs i en plansilo.



**Figur 3.** Eftermodning af komposteret biomasse og strukturmateriale før sortering (se evt. Figur 12).

Under eftermodningen beluftes komposten ved indblæsning fra huller i bunden af plansiloen. Eftermodningen varer mindst 10 uger, afhængig af årstid og nedbør, hvorefter komposten renses for strukturmateriale på et 10 mm tromlesold. Komposten er herefter klar til udbringning.

I den normale procedure på BioVækst anvendes der ca. 30 minutter på at rengøre procesmodulet og dernæst ca. 20 minutter på at lægge et lag groft strukturmateriale i bunden af modulet. Opfyldningen af modulet med ca. 250 tons biomasse + strukturmateriale tager ca. 5 - 8 timer. Tiden afhænger dog af, om der iblandes strukturmateriale og arbejdets tilrettelæggelse i øvrigt.



Flytning af materialet efter første kompostering (omstikning) og tømning efter den anden kompostering, hvor komposten lægges til eftermodning, tager hver ca. 3 timer, dvs. i alt 6 timer. Den endelig sortering af kompost og strukturmateriale tager ca. 3 timer.

### 3.2. Forsøgsbeskrivelser

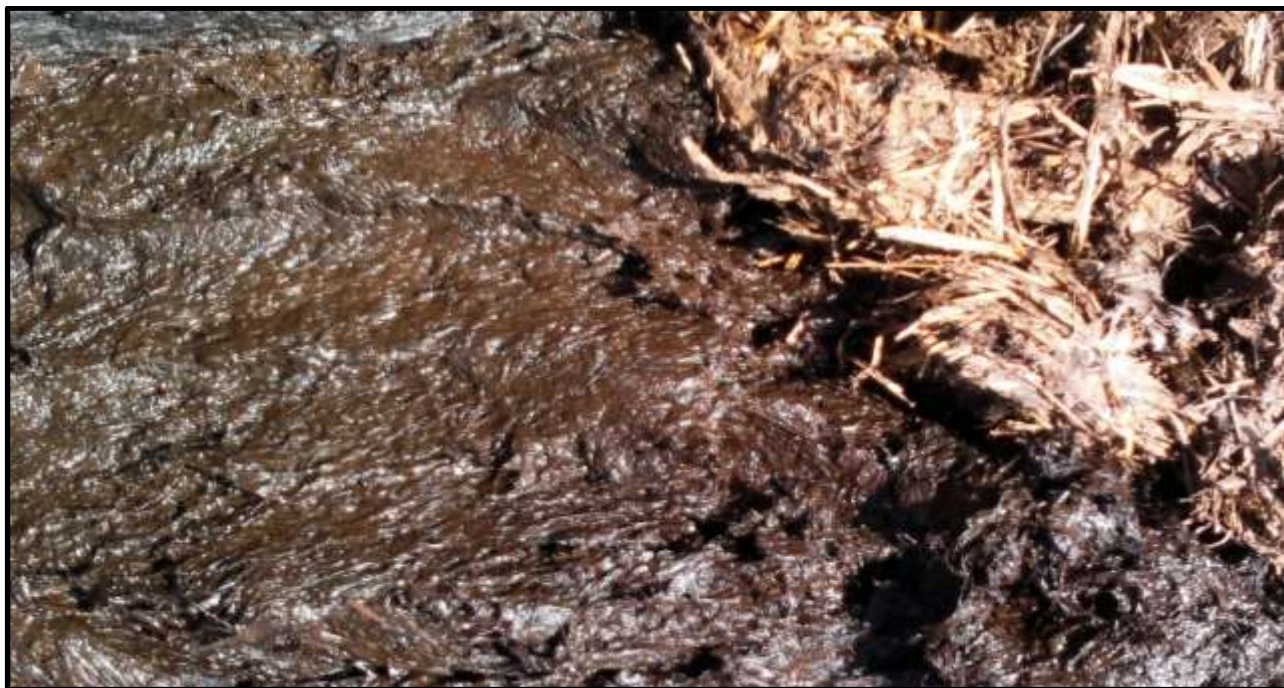
Til demonstrationsforsøgene blev der, så vidt muligt, anvendt Aikans standardprocedurer for KOD. De enkelte demonstrationsforsøg er beskrevet kort herunder.

#### 3.2.1. Dybstrøelse (Forsøg 1)

I dette forsøg blev der anvendt 100 tons dybstrøelse. Det var aftalt med det landbrug, som leverede dybstrøelsen, at den afgassede restmasse ikke skulle komposteres, men leveres tilbage til landbruget straks efter afgangningen. Dybstrøelsen blev derfor ikke opblandet med strukturmateriale, men aflæst i procesmodulet efter 5 minutters knusning i foderblanderen.

Overvandingen med reaktorvæske foregik i 33 døgn. Efter 21 døgn blev afdræningen standset og massen i procesmodulet blev oversvømmet med reaktorvæske til en væskestandshøjde på 180 cm. Massen forblev oversvømmet i de resterende 12 døgn, hvor der blev produceret biogas både i det oversvømmede procesmodul og i reaktortanken.

Efter at overvandingen var stoppet, blev den udrådne masse afdrænet i ca. to døgn, hvorefter den blev leveret tilbage til landbruget.



**Figur 4.** Udrådnede (venstre) og frisk dybstrøelse (højre).

### 3.2.2. Dybstrøelse, gyllefibre og græs/urter (Forsøg 2)

Formålet med dette forsøg var, at demonstrere produktionen af biogas og kompost på basis af de biomasser, som sandsynligvis ville være til rådighed i størst mængde i et tænkt fællesanlæg med input fra ca. 15 bedrifter: dybstrøelse, gyllefibre og græs. De mængder, der blev anvendt i forsøget, er vist i Tabel 2.

Dybstrøelse blev leveret fra et lokalt kvægbrug. Separeret gylle fra slagtesvin og derfor med et relativt højt tørstofindhold blev leveret fra et lokalt svinebrug. Græsensilagen var fremstillet af en blanding af græs og urter (især rørgæs med kåltidse, brændenælde) fra et udyrket eng-/moseareal. Det blev slået i begyndelsen af juli, og efter en dags vejring blev biomassen presset og ensileret som wrap-baller.

Procesmodulet blev fyldt med ca. 100 tons biomasseblanding. Biomassen blev blandet med 30 tons friskt strukturmateriale, inden den blev kørt ind i procesmodulet.

Bioafgasningen foregik som beskrevet under forsøg 1, men med en procestid på 42 døgn. Efter 28 døgn og i resten af procestiden var massen oversvømmet med reaktorvæske således, at der blev produceret biogas både i procesmodulet og i reaktortanken.



**Figur 5.** Separerede svinegyllefibre (forrest), dybstrøelse (bagerst) og græs + urter (på skovlen).

**Tabel 2.** Forsøgsmængder af restbiomasserne dybstrøelse, svinegyllefibre og græsensilage, som blev anvendt i forsøg 2. Desuden vises mængden af organisk tørstof (VS) i de pågældende biomasser.

<b>Materiale</b>	<b>Forsøgsmængder, tons</b>	<b>Tørstof, tons</b>	<b>Organisk tørstof (VS), tons</b>
<b>Dybstrøelse</b>	49	13,7	11,5
<b>Gyllefibre</b>	37	8,5	5,9
<b>Græsensilage</b>	14	3,1	2,9
<b>I alt</b>	100	25,3	20,3

Efter afgangningen blev massen afdrænet i et døgn, hvorefter komposteringsprocessen startede ved mekanisk beluftning i procesmodulet, omstikning og eftermodning, som beskrevet ovenfor.

### **3.2.3. Hestemøg (Forsøg 3)**

Forsøget skulle demonstrere mulighederne for at bioafgasse hestemøg fra rideskoler o. lign., da der er en ret stor koncentration af disse i de ellers husdyrfattige områder på Sjælland. Hestemøget blev leveret fra en rideskole og var ved levering med tydelig halmstruktur, men forholdsvis omsat og med en lugt af muld.

I midten af november 2014 blev ca. 68 tons hestemøg, der var opblandet med 22 tons strukturmateriale, læsset ind i procesmodulet. Bioafgasningen varede 62 døgn, hvoraf massen i procesmodulet var oversvømmet i de sidste 17 døgn.

Efter afgangningen blev massen afdrænet i et døgn. Herefter startede komposteringsprocessen ved gennembluftning af massen i procesmodulet, efterfulgt af omstikning og eftermodning, som tidligere beskrevet.

### **3.2.4. Halm + kløver (Forsøg 4)**

Til forsøget blev der anvendt snittet hvedehalm med kløver. I kornet var der sået et udlæg af kløver, som efter kornhøsten skulle udvikle sig som efterafgrøde. Ved høsten i august, blev der i marken derfor efterladt 30 - 40 cm stub.



**Figur 6.** Høst af hvede med høj stub.

Desværre var sensommeren 2013 meget tør og væksten i kløverudlægget efter kornhøsten var ikke stor. Derfor blev andelen af kløvermasse i forhold til halm ret lav. Det skønnes, at den har været på 10-15 % af totalvægten. Halm + kløver blev høstet i begyndelsen af november og biomassen blev ensileret i plansilo indtil bioafgasningen startede.



**Figur 7.** Høj hvedestub med kløverudlæg fotograferet i oktober.

I begyndelsen af marts 2014 blev 47 tons ensileret halm + kløver opblandet med 15 tons strukturmateriale læsset ind i procesmodulet. Bioafgasningen varede 45 døgn, hvoraf massen i procesmodulet var oversvømmet i de sidste 15 døgn.

Efter afgasningen blev massen afdrænet i et døgn, efterfulgt af komposteringsprocessen med gennembluftning af massen i procesmodulet, omstikning og eftermodning, som tidligere beskrevet.

### **3.2.5. Græs/urter (Forsøg 5)**

Biomassen i dette forsøg var græs og større urter (især rørgræs med kåltidsel, brændenælde) fra et udyrket eng/moseareal. Det blev slået i begyndelsen af juli 2014, og efter en dags vejring blev biomassen presset og ensileret som wrap-baller.



**Figur 8.** Slæt af græs og urter på engareal ved Knabstrup.

I slutningen af september blev 100 tons biomasse blandet op med 30 tons strukturmateriale og læsset ind i procesmodulet. Porten blev lukket og bioafgasningen startede den 29. september. Bioafgasningen varede 51 døgn, hvoraf massen i procesmodulet var oversvømmet i de sidste 15 døgn.

Efter afgangningen blev massen afdrænet i et døgn, hvorefter komposteringsprocessen startede ved gennemluftning af massen i procesmodulet. Komposteringen var ikke afsluttet på tidspunktet for projektets afslutning og afrapportering. Resultatet forventes at foreligge i første halvdel af 2015.

I alle demonstrationsforsøgene er der gennem hele procesperioden løbende målt biogasproduktion og -kvalitet (metanindhold), pH og indhold af organisk stof i perkolat og reaktorvæske.

Et sammendrag af de vigtigste forsøgsbetingelser er vist i Tabel 3 herunder.

**Tabel 3.** Sammendrag af forsøgsbetingelserne i demonstrationsforsøgene i fuld skala.

Forsøg	Biomasse	Biomasse, tons	Strukturmateriale, tons	Procestid, døgn	Oversvømmet, døgn	Kompostering
1	Dybstrøelse	100	-	33	12	Nej
2	Dybstrøelse + gyllefibre + græs	100	30	42	14	Ja
3	Hestemøg	68	22	62	28	Ja
4	Halm + kløver	47	15	45	15	Ja
5	Græs + urter	100	30	51	15	(Ja)*

\* Komposteringen var ikke afsluttet på tidspunktet for afrapporteringen.

### 3.3. Resultater

#### 3.3.1. Tørstof

Resultaterne af tørstofanalyserne er vist i Tabel 4. Værdierne i forsøg 2 er baseret på målingerne af totalt tørstof og organisk tørstof for de enkelte biomasser hver for sig. Tørstofindholdet i biomasseblandingen er derefter beregnet ud fra i de forhold, hvormed de indgår i forsøget.

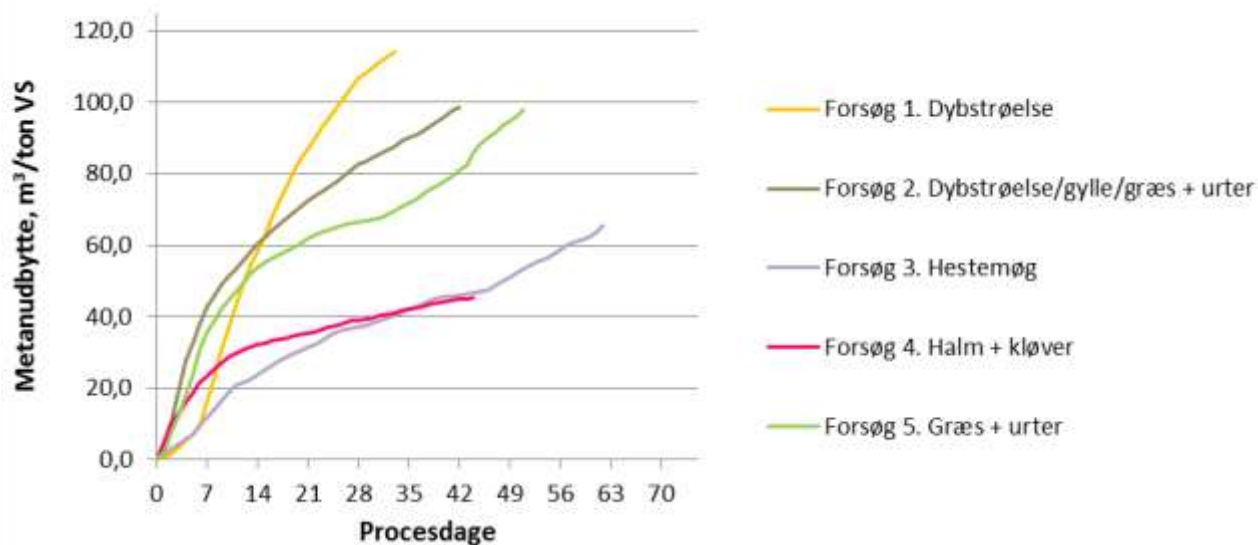
**Tabel 4.** Totalt tørstof (TS), angivet som procent af friskvægt (FV). Organisk tørstof (VS), angivet som procent af hhv. friskvægt og totalt tørstof og som absolut mængde (tons) i biomasserne i de 5 demonstrationsforsøg.

Forsøg	Biomasse	Totalt tørstof, % TS(FV)	Organisk tørstof, % VS(FV)	Organisk tørstof, % VS(TS)	Organisk tørstof, tons
1	Dybstrøelse	28	24	84	24
2	Dybstrøelse + gyllefibre + græs	28	23	82	20
3	Hestemøg	49	38	79	26
4	Halm + kløver	42	41	97	19
5	Græs + urter	22	20	93	20

Bemærk at tørstofindholdet i græs + urter, der er slået på eng/mose er ret lavt. Det lave tørstofindhold skyldes formentlig den korte vejringstid.

#### 3.3.2. Produktion af biogas og metan

Udviklingen i gasproduktionen i de fire demonstrationsforsøg er vist i 9. Eftersom metanindholdet i biogassen varierede over tid og mængden af biomasse i forsøgene ikke var ens, er forløbet vist som udbytte af rent metan per ton organisk tørstof.



**Figur 9.** Udvikling af gasproduktion i forsøgene i fuld skala med dybstrøelse (forsøg 1), blanding af dybstrøelse, svinegyllefibre og enggræs + urter (forsøg 2), hestemøg (forsøg 3) ensileret halm + kløver (forsøg 4) og ensileret enggræs + urter (forsøg 5).

Biogassen i reaktortanken havde det højeste metanindhold, 65 - 75 %, mens metanindholdet i procesmodul lå mellem ca. 35 og 40 % i oversvømmelsesperioden. Selvom metanindholdet varierede, var det dog stort set altid større end 65 % efter opblandingen af biogassen fra procesmodul og reaktortank, hvilket er en forudsætning for tilfredsstillende funktion af gasmotoren.

Alle forsøgene er af tidsmæssige og tekniske årsager afsluttet før biogasproduktionen er stagneret eller helt ophørt og det er tydeligt, at der ville kunne produceres mere gas ved længere opholdstid (9).

Selvom mængden af organisk tørstof i de enkelte forsøg var nogenlunde det samme (Tabel 4), er udviklingen i biogasproduktionen forskellig i forsøgene. Mest markant er den lave produktionsrate i hestemøg (forsøg 3) og halm + kløver (forsøg 4) i forhold til de øvrige forsøg.

Dybstrøelse (forsøg 1) skiller sig desuden lidt ud ved at have en periode i starten af procesforløbet med lille biogasproduktion, der ikke umiddelbart kan forklares.

Både i forsøg 1 og forsøg 4 udgør halm en meget stor del af tørstoffet, men der er stor forskel på udbyttet i de to forsøg. Det har en tydelig positiv virkning på gasudbyttet, når halmen først har været anvendt som strøelse i forhold til, at halmen har været ensileret sammen med kløvermasse.

I græs + urter (forsøg 5) ser det ud til at oversvømmelsen af procesmodul fra procesdag 29 har haft en positiv virkning på gasproduktionen ved, at der produceres biogas i både procesmodul og reaktortank, så den samlede gasproduktion stiger. Det samme ses i forsøget med hestemøg fra procesdag 45 (forsøg 3), men ikke så markant.

De absolutte og specifikke udbytter er vist i Tabel 5 herunder. I forsøg 2 blev der ikke målt biogasproduktion i procesmodul på grund af udskiftning af gasmåler, men, baseret på



driftserfaring, skønnes biogasudbyttet at være ca. 500 m<sup>3</sup> og metanudbyttet 325 m<sup>3</sup>. De skønnede totaludbytter er vist i tabellen i parentes.

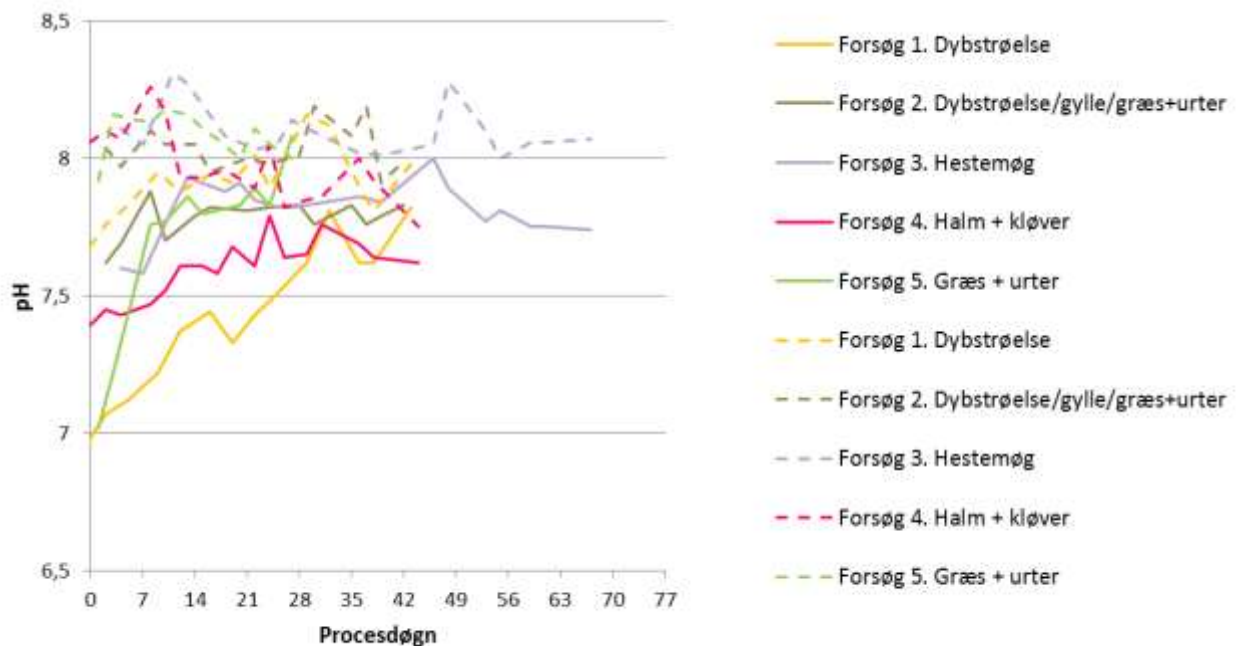
Sammenlignet med metanpotentialerne (Tabel 1) varierer udbytterne i demonstrationsforsøgene mellem 25 og 75 procent af disse ved en opholdstid på ca. 6 - 9 uger. Som nævnt, ser det ud til at større udbytter kan opnås ved en længere opholdstid. I Tyskland, hvor bioafgasning af faste masser er mere udbredt end i Danmark, er opholdstiden ved tør afgasning ofte 15 - 25 uger.

**Tabel 5.** Udbytte af biogas og metan fra de 5 demonstrationsforsøg efter 6-9 ugers udrådning. Desuden er vist de specifikke udbytter, hhv. pr ton friskvægt (FV) og pr ton organisk tørstof (VS) og udbytte i forhold til det målte metanpotentiale (MP); se også Tabel 1. For forsøg 2 viser værdierne i parentes de forventede udbytter, når det antages, at der er produceret 500 Nm<sup>3</sup> biogas med 325 Nm<sup>3</sup> metan (65 %) i procesmodulet.

Forsøg	Biomasse	Procestid, døgn	Biogas, Nm <sup>3</sup>	Metan, Nm <sup>3</sup>	Metan/ton FV, Nm <sup>3</sup>	Metan/ton VS, Nm <sup>3</sup>	Udbytte, (% af MP)
1	Dybstrøelse	43	4462	2745	27	114	56
2	Dybstrøelse + gyllefibre + græs	42	3223 (3723)	2198 (2523)	22 (25)	108 (124)	46 (52)
3	Hestemøg	62	1980	1595	24	61	75
4	Halm + kløver	44	1448	860	18	45	46
5	Græs + urter	51	3024	1959	20	96	26

### 3.3.3. pH i perkolat og reaktorvæske

I forsøgene blev der målt pH i perkolat fra procesmodul og i reaktorvæsken. Optimumsområdet for pH under hydrolysen i procesmodulet er mellem 5 og 6. I reaktorvæsken er optimumsområdet mellem 6,8 og 7,5. Ved lavere pH lavere hæmmes de metanproducerende bakterier. Ved højere pH (> 8) kan der dannes ammoniak, som er giftig for bakterierne. Overvågning og optimering af pH er derfor nødvendig. 10 viser udviklingen i pH i procesmodul og reaktortank i demonstrationsforsøgene.



**Figur 10.** Udviklingen i pH i procesmoduler (ubrudt linje) og reaktortanke (stiplet linje) i demonstrationsforsøgene 1 - 5.

Som det fremgår af figuren ligger pH lidt højere end optimum, både i forhold til hydrolyseprocessen og biogasprocessen. Sænkning af pH kan ske ved at fremme hydrolysen, dvs. dannelsen af organiske syrer og det kan muligvis ske ved gradvis tilsætning af mere let omsætteligt materiale til massen. Disse forhold er dog ret komplekse og vil ikke blive uddybet yderligere her.

### 3.3.4. Temperatur

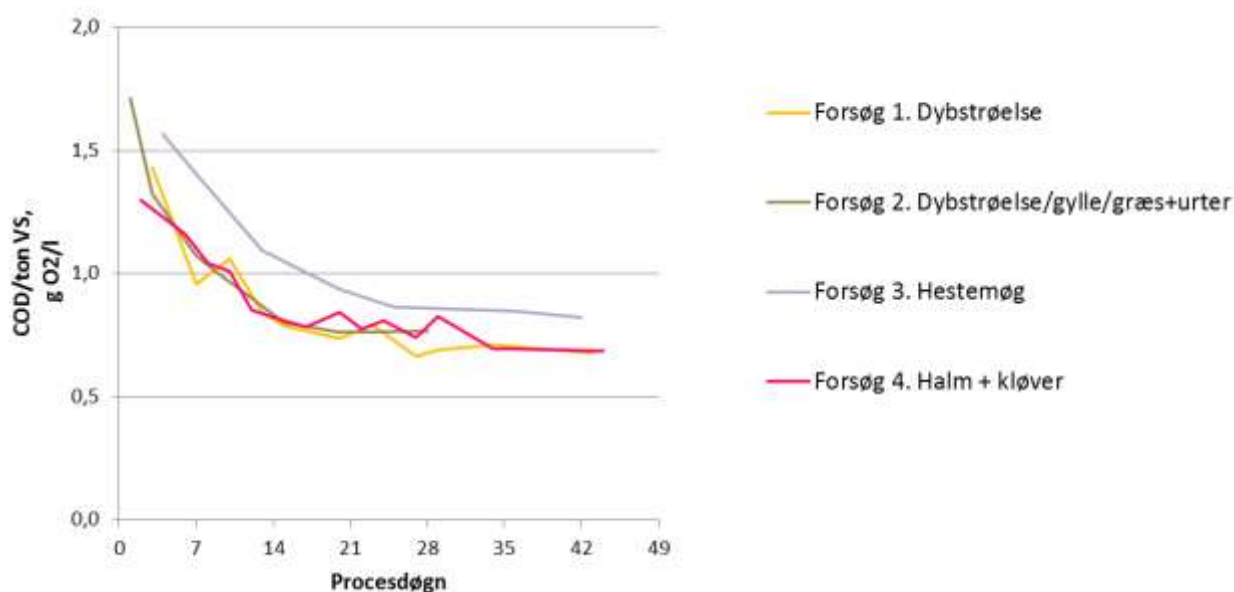
Temperaturen i reaktortanken var i alle forsøgene ret konstant ca. 38 °C (mesofil proces). Der måles ikke temperatur inde i procesmodulet under overvandingen, kun temperaturen i den reaktorvæske, der pumpes ind i sprinklerne fra en såkaldt procestank. Procesmodulet er isoleret og vi formoder, at modulets temperatur er omtrent den samme som temperaturen af væsken i procestanken. Nedenstående væsketemperaturer i procestanken er målt i forsøgene (Tabel 6).

**Tabel 6.** Gennemsnitlige temperaturer, målt i reaktorvæsken inden den pumpes ind i procesmodulet.

Forsøg	Biomasse	Temperatur, °C
1	Dybstrøelse	34,9
2	Dybstrøelse + gyllefibre + græs	38,2
3	Hestemøg	37,2
4	Halm + kløver	36,5
5	Græs + urter	38,7

### 3.3.5. Hydrolysen

Under hydrolyseprocessen nedbrydes og opløses det organiske materiale, som pumpes til reaktortanken, hvor det omdannes til biogas. Mængden af opløst organisk stof kan måles, som den mængde ilt der forbruges ved fuldstændig kemisk forbrænding af det organiske materiale, det såkaldte Chemical Oxxygen Demand eller COD (kemisk iltbehov). Dvs., jo mere organisk stof, jo større iltbehov. COD måles som gram ilt pr. liter væske. Under demonstrationsforsøgene blev der løbende taget prøver af perkolat og reaktorvæske og målt COD, for at følge nedbrydningen og omsætningen af organisk materiale. viser udviklingen i COD i procesmodulet løbet af forsøg 1 - 4.



**Figur 11.** Udvikling i opløst organisk stof i demonstrationsforsøgene under hydrolysen i procesmodulet (PM), udtrykt som kemisk iltbehov (COD). Da der er anvendt forskellige mængder biomasse i forsøgene, angives opløst organisk stof i forhold til den samlede mængde organisk tørstof i forsøget; dvs. COD/ton VS.

Figuren viser, at mængden af opløst organisk stof aftager hurtigt i de første 2 - 3 uger, hvorefter den stabiliserer sig. Det sker hurtigst for dybstrøelse og blandingen af dybstrøelse, gylle og græs, hvor der muligvis er mere let omsætteligt organisk stof, der hurtigt fjernes (omdannes til biogas). Der frigives mere organisk stof fra hestemøget gennem hele procesforløbet, men dette afspejles ikke i biogasproduktionen (se Figur 9). Hestemøget var, som nævnt, tilsyneladende ret omsat ved

leveringen på BioVækst, og derfor kan de let omsættelige forbindelser i hestemøget allerede være borte. I perkolatet kan have været opløst partikulært/fiberholdigt og svært omsætteligt organisk stof og COD-analysen skelner ikke mellem dette og let omsætteligt stof.

## 4. Gødningsprodukter og næringsstoffer

### 4.1. Gødningsprodukter

I forsøg 1 (dybstrøelse) var der efter afdræning af procesmodulet ca. 80 tons udrådnet restmasse tilbage af de oprindelige 100 tons dybstrøelse. Denne rest blev ikke komposteret men leveret direkte tilbage til landbruget. Der blev udtaget prøver af den friske dybstrøelse og af den udrådnede rest til analyse for plantenæringsstoffer. Desværre gik prøven med frisk dybstrøelse tabt før analysen. I tabel 6 nedenfor er der derfor medtaget analyseværdier for et andet parti frisk dybstrøelse fra samme landbrug (vist i parentes).



**Figur 12.** Udsortering af kompost og strukturmateriale. Bunken til højre er færdig kompost.

I forsøg 2 blev der produceret 32 tons kompost af de oprindelige 100 ton blandet biomasse (dybstrøelse, gyllefibre og græs + urter).

I forsøg 3 blev der fremstillet 66 tons kompost af 68 tons biomasse (hestemøg).

I forsøg 4 blev der fremstillet 36 tons kompost af 47 tons oprindelig biomasse (halm + kløver). Denne var dog ikke så omsat som komposten i forsøg 2.

I forsøg 5 anvendes det samme råmateriale (græs + urter), som indgår i forsøg 2.

Analyseresultaterne form de friske masser er derfor identiske. Komposteringen er ikke færdig ved rapportens afslutning.

## 4.2. Næringsstofanalyser

Der blev i alle forsøgene udtaget prøver til analyse af næringsstoffer i råmaterialer og, i visse forsøg, i den udrådnede rest efter bioafgasning samt i den færdige kompost. Resultaterne er vist i Tabel 7, både som næringsstofkoncentrationer (kg pr. ton tørstof) og som næringsstofmængder (kg) i de anvendte friske biomasser og i gødningsprodukterne (udrådnet masse og/eller kompost).

**Tabel 7.** Næringsstofkoncentration (kg/tons tørstof) og -mængde (kg) i friske råmaterialer, udrådnet masse og kompost i demonstrationsforsøg 1- 5. Resultaterne for frisk masse i forsøg 1 stammer fra en senere udtaget prøve, men som er sammenlignelig med den oprindelige prøve, der gik tabt (se tekst). For forsøg 2 er vist data for frisk dybstrøelse (a), gyllefibre (b) og græsensilage (c) både separat og i blanding, samt den udrådnede og komposterede blanding. Sandsynlige fejlværdier er markeret med (!).

Forsøg	Materiale	Næringsstoffer, kg/ton TS			Tørstof, tons	Næringsstoffer, kg		
		Kvælstof, N	Fosfor, P	Kalium, K		Kvælstof, N	Fosfor, P	Kalium, K
1	<b>(Dybstrøelse, frisk masse)</b>	(35)	(7,7)	(36)	(28)	(980)	(216)	(1008)
	<b>Dybstrøelse, udrådnet</b>	36	5,7	23	23,2	837	132	535
2	<b>Dybstrøelse, frisk masse (a)</b>	35	7,7	36	13,7	480	106	494
	<b>Gyllefibre, frisk masse (b)</b>	27	10	13	8,5	230	85	111
	<b>Græs + urter, frisk ensilage (c)</b>	33	3,6	22	3,1	102	11,2	68,2
	<b>Blanding af a+b+c, frisk masse</b>	32	8,0	27	25,3	812	202	673
	<b>Blanding af a+b+c, udrådnet</b>	19	6,8	22	20,2	384	137	444
	<b>Blanding af a+b+c, kompost</b>	20	9,7	18	13	262	127	236
	<b>Hestemøg, frisk masse</b>	16	4	30	31	496	124	930
3	<b>Hestemøg, kompost</b>	20	4	20	29	580(!)	116	580
4	<b>Halm + kløver, frisk ensilage</b>	13	1,6	11	16	221	26	181
	<b>Halm + kløver, kompost</b>	30	2,7	27	10	299(!)	27(!)	269(!)
5	<b>Græs + urter, frisk ensilage</b>	33	3,6	22	22	726	79	484

Analyserne antyder, at der sker et tab af næringsstoffer, både af kvælstof (N), fosfor (P) og kalium (K), men resultaterne er ikke entydige.

I forsøg 2 er der et tab på 67 % af det oprindelige kvælstof i tørstoffet. Kvælstoftabet kan delvist forklares ved ammoniakfordampning under komposteringen, hvor pH og temperaturen er høj. Men det ser også ud til at, en stor del af kvælstoftabet i den faste masse (53 %) sker allerede under trin 1 (hydrolysen), mens kun en mindre del (15 %) tabes under komposteringen. Der blev i forsøgene desværre ikke målt næringsstofindhold i perkolat og reaktorvæske, da det blev antaget, at denne recirkulerede internt. Det er derfor muligt, at en del af det forsvundne kvælstof fandtes opløst i reaktorvæsken.

Omvendt er der i forsøg 3 og 4 målt en stigning i tørstoffets kvælstofindhold, ikke bare i koncentrationen, men også i mængden. Det er naturligvis muligt, at der kan ske en stigning i koncentrationen, men næppe i mængden af næringsstof. Der kan være tale om en målefejl, idet den eneste måde hvorpå ekstra kvælstof kan være tilført er ved overførsel af kvælstof fra perkolat i reaktortanken. Halmen kan således have bundet kvælstof.

Tab af fosfor og kalium kan ikke forklares ved fordampning, da disse forekommer i opløst form. For P og K er det derfor overvejende sandsynligt, at det forsvundne stof også findes er opløst i reaktorvæsken.

Hvis N, P og K findes opløst i reaktorvæsken, er det derfor ikke tabt, men kan udbringes på flydende form. Det bør undersøges nærmere, hvor meget der opløses i reaktorvæsken under processen. Kvælstoftabet i form af ammoniakfordampning under kompostering kan mindskes ved at forkorte eller undlade komposteringen.

En anden mulighed er, at en del af næringsstofindholdet er udfældet som fast stof i reaktortanken, f.eks. som krystallinsk struvit ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) eller andre uorganiske forbindelser. Det er desuden vist, at træ kan have en vis kationombytningskapacitet og derfor er det muligt at kalium kan have bundet sig til strukturmaterialiet. Da strukturmaterialiet genanvendes og efterhånden nedbrydes i komposten, vil det bundne kalium blive tilbageført til komposten over tid.

## 5. Udviklingspotentiale og perspektivering

Resultaterne af forsøgene i fuld skala har bidraget til en bedre forståelse af mekanismerne ved Aikan processen i relation til udrådning af svært omsættelige biomasser. Det ser, trods visse udfordringer, lovende ud for produktionen af biogas og samtidig udnyttelse af næringsstofferne i de faste biomasser.

Gasproduktionen kan, som det tydeligt er vist, forøges ved at forlænge behandlingstiden udover de 30 - 60 dage der blev anvendt i forsøgene. Det er de biologiske processer, som knyttes til hydrolysen, der specifikt skal fremmes. Det er kendt fra andre arbejder, at hydrolysen og navnlig de enzymatiske effekter øges ved højere temperatur. Denne kan opnås ved bedre isolering af procesmodulerne i kombination med en termofil reaktorproces. Der er en økonomisk fordel ved at behandlingstiden ikke bliver for lang, da meget lang behandlingstid kræver større behandlingskapacitet. At forøge temperaturen er en helt oplagt potentiel forbedringsmulighed for gasudbyttet.

Mht. gødningsproduktionen er det tydeligt, at der skal ske en opsporing af de "forsvundne gødningsmængder". P og K kan ikke forsvinde ud i luften og må derfor forefindes i systemet. Det samme gælder for kvælstof forud for komposteringsprocessen. Plantetilgængeligheden af

næringsstoffer før og efter processen er et område, som lå udenfor dette projekt, men det vil i kombination med opsporing af tab være et særdeles interessant emne. Det vides generelt, at bioafgasning af f.eks. gylle forøger tilgængeligheden af næringsstofferne for plantevækst.

Det er vores håb, at et fremtidigt projekt med fokus på massebalancen fra mark til mark via Aikan-processen kan vise, at teknologien kan blive til gavn for økologisk jordbrug.