



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Miljøprojekt om forbrændt husdyrgødning – litteraturstudie og forbrændingsforsøg

Miljøprojekt nr. 2136

Juni 2020

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Jørgen Hinge, Teknologisk Institut

Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut

Morten Gottlieb Warming-Jespersen, Teknologisk Institut

Helena Nielsen, Teknologisk Institut

Anders Pødenphant, Teknologisk Institut

Fotos:

Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut

Morten Gottlieb Warming-Jespersen, Teknologisk Institut

Helena Nielsen, Teknologisk Institut

Anders Pødenphant, Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7038-198-7

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Sammendrag	5
1.1	Litteraturstudie	5
1.2	Forbrændingsforsøg og askeanalyser	9
2.	Summary in English	11
2.1	Literature review	11
2.2	Combustion trials	15
3.	Indledning	17
4.	Baggrund	18
5.	Opgavebeskrivelse	19
5.1	Delopgave 1 - litteraturstudie	19
5.2	Delopgave 2 - forbrændingsforsøg	19
6.	Litteraturstudie	21
6.1	Metodebeskrivelse og strukturering	21
6.2	Typer af husdyrgødning	23
6.3	Relevante forbehandlingsmetoder	27
6.4	Viden om næringsstoffer og tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning	38
6.5	Viden om diverse miljøfremmede stoffer fra forbrænding af husdyrgødning	51
6.6	Viden om emission af NO _x , CO og støv fra forbrænding af husdyrgødning	54
6.7	Vurdering i forhold til Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen	57
6.8	Konklusion fra litteraturstudiet	70
7.	Forbrændingsforsøg	72
7.1	Metodebeskrivelse	72
7.2	Resultater	84
7.3	Konklusion fra forbrændingsforsøget	97
8.	Sammenfattende konklusioner og anbefalinger	98
9.	Referencer	101
	Bilag 1. Analysecertifikater	106

1. Sammendrag

Der er gennemført et projekt til afdækning af forhold omkring forbrænding af husdyrgødning til energiformål med særlig fokus på indholdsstoffer i aske fra forbrændingen. Projektet omfatter et litteraturstudie samt en forsøgsserie med forbrænding af forskellige typer husdyrgødning.

1.1 Litteraturstudie

Der er gennemført et litteraturstudie til afdækning af eksisterende viden om forbrænding af husdyrgødning. Studiet omfatter et overblik over typer og mængder af husdyrgødning i Danmark, mulige forbehandlingsmetoder til husdyrgødning før forbrænding, viden om næringsstoffer og tungmetaller i aske fra husdyrgødning, viden om diverse miljøfremmede stoffer fra forbrænding af husdyrgødning, viden om emission af CO og NO_x fra forbrænding af husdyrgødning samt en vurdering i forhold til bioaskebekendtgørelsen.

Typer af husdyrgødning og relevans i forhold til forbrænding

Husdyrgødningstyper og -mængder: Den samlede årlige produktion af husdyrgødning i Danmark udgør ca. 43 mio. tons, hvoraf 96% stammer fra kvæg og svin. Gylle og dybstrøelse udgør hhv. 90 og 9% af husdyrgødningen. Gylle har generelt lavt tørstofindhold, især for svinegylle, mens dybstrøelse fra svin og kvæg typisk indeholder 30% tørstof, og dybstrøelse fra fjerkrægødning kan indeholde mellem 50 og 70% tørstof. Fiberfraktionen fra separering af gylle indeholder typisk 30% tørstof. Ud fra et forbrændingsteknisk synspunkt har de fleste gødningstyper derfor for lavt tørstofindhold til at kunne forbrændes uden yderligere tørring eller iblandning af tørrere støttebrændsel. For fjerkrægødning og hestegødning, som indeholder store mængder halm, kan tørstofindholdet dog i nogle tilfælde være tilstrækkeligt højt til forbrænding.

Incitament for forbrænding: Ud fra et landbrugsmæssigt synspunkt vil forbrænding af husdyrgødning ofte være knyttet til forhold omkring næringsstofindhold i gødningen og næringsstofsituationen i nærområdet omkring husdyrproduktionen. Ikke mindst vil overskud af fosfor i områder med stor husdyrproduktion kunne udgøre et incitament for forbrænding eller andre former for opkoncentrering, som reducerer omkostningerne til at transportere fosfor til områder med underskud. Forbrænding kan derfor bl.a. være relevant for fjerkrægødning pga. højt fosforindhold. Forbrænding kan også være relevant for fiberfraktionen af separeret afgasset gylle, ikke mindst for anlæg som anvender betydelige mængder fosforrige restbiomasser. Endelig kan forbrænding af hestegødning være relevant pga. et relativt højt tørstofindhold, samt fordi ride-skoler mv. typisk ikke har jordtilliggende, hvor gødningen kan udsprede med det formål at gøde afgrøder. Endelig kan der for de meget tørre gødningstyper som hestegødning og fjerkrædybstrøelse være et økonomisk incitament i form af besparelse på indkøb af energi, hvis varmen fra forbrænding af gødningen kan afsættes eller anvendes på egen bedrift.

Relevante forbehandlingsmetoder for husdyrgødning forud for forbrænding

Forud for forbrænding kan det være relevant med forskellige former for forbehandling af husdyrgødningen, og et primært mål med forbehandlingen vil være at øge tørstofindholdet. Dette øger den effektive brændværdi og kan derved sikre en god forbrænding på minimum 850°C samt reducere risikoen for emission af uønskede stoffer. Forbehandlingsmetoderne kan dog også have til formål at øge indholdet af næringsstoffer i forskellige fraktioner af husdyrgødningen. Der er gennemgået fire hovedprincipper for forbehandling af husdyrgødning.

Separering: Forskellige teknologier kan anvendes til separering af uafgasset og afgasset gylle i en fiberfraktion og væskefraktion, hvor en stor del af tørstoffet og fosforen opkoncentreres i fiberfraktionen. Tørstofindholdet i fiberfraktionen er typisk i størrelsesordenen 25-35%. Brændværdien efter tørring er lidt højere for kvæggylle end svinegylle og afgasset gylle og lavest for minkgylle. Ved skruepresning og dekantercentrifugering reduceres koncentrationen (på tørstofbasis) af tungmetallerne kobber, zink og cadmium i fiberfraktion, mens der ved kemisk fældning sker en opkoncentrering i fiberfraktionen. Generelt må evt. patogene bakterier kunne forventes at være til stede i både fiberfraktionen og væskefraktionen, hvorfor begge fraktioner vil kunne medføre en smitterisiko tilsvarende den useparerede gødning.

Afgasning i biogasanlæg: Ved afgasning i biogasanlæg omsættes typisk 60-80% af det organiske stof i husdyrgødningen til metan m.m. Brændværdien af den resterende del af det organiske stof vil afhænge af biomassen, men pga. et højere ligninindhold kan brændværdien være lige så høj som før afgasning til trods for et højere askeindhold. Afgasning af husdyrgødning kan medføre en opkoncentrering af tungmetaller målt på tørstofbasis men øger desuden indholdet af ammonium-kvælstof.

Tørring: Ved tørring af husdyrgødning fjernes vand og den effektive brændværdi øges, men energiforbruget til tørring reducerer nettoenergiudbyttet. Ved tørring er det endvidere vigtigt at håndtere den ammonium-kvælstof, der frigives under tørreprocessen.

Iblanding af støttebrændsel: Iblanding af en mere tør biomasse i husdyrgødningen kan medvirke til at øge tørstofindholdet og dermed forbedre forbrændingen. Der er på forsøgsbasis opnået gode erfaringer med iblanding af halm eller træflis.

Ofte vil det være relevant med kombinationer af flere forskellige forbehandlingsteknologier forud for forbrænding af husdyrgødning, f.eks. afgasning efterfulgt af separering samt separering kombineret med enten tørring eller iblanding af støttebrændsel. Den optimale kombination af type af husdyrgødning og type af forbehandling vil formodentlig afhænge af de konkrete forhold.

Viden om næringsstoffer og tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning

Indhold af plantenæringsstoffer i aske: Ved forbrænding af husdyrgødning tabes stort set alt kvælstof, og en del af svovlen vil ligeledes fordampe. Derimod bevares hovedparten af fosfor, kalium og andre vigtige plantenæringsstoffer i asken. Koncentrationen af næringsstoffer i asken varierer markant mellem gødningstyper, bl.a. med højere indhold af fosfor i aske fra svinegyllefiber end kvæggyllefiber, og med højt indhold af kalium i aske fra fjerkrægødning. I nogle forbrændingsanlæg udtages aske i forskellige fraktioner, og fordelingen mellem bundaske og flyveaske kan variere betydeligt. Koncentrationen af kalium og svovl er højest i flyveaske, koncentrationen af fosfor er lidt højere i flyveaske end bundaske, mens koncentrationen af kalcium og magnesium er højest i bundaske. pH er generelt høj i aske, og ledningsevnen kan også være høj afhængig af gødningstype.

Plantetilgængelighed af næringsstoffer i aske: Tilgængeligheden af næringsstoffer i aske fra husdyrgødning varierer mellem grundstofferne med relativt høj tilgængelighed af f.eks. kalium og lav tilgængelighed af fosfor, kalcium og magnesium. Tilgængeligheden af fosfor falder med stigende forbrændingstemperatur, ligesom tilgængeligheden er lavere i bundaske end i flyveaske. Aske fra forbrænding af husdyrgødning er derfor ikke egnet som startgødning, men gødningsvirkningen er på lang sigt sandsynligvis tilfredsstillende, bl.a. fordi plantetilgængeligheden øges, når asken reagerer med især sur jord.

Smeltepunkt for aske: Smelteforløbet for aske fra husdyrgødning varierer mellem gødningstyper med højt smeltepunkt for fjerkrægødning og lavere for f.eks. hestegødning og kvæggyllefiber, hvilket kan gøre disse typer til mere besværlige brændsler pga. risiko for slaggedannelse i kedlen.

Tungmetaller i aske: Husdyrgødning indeholder tungmetaller i varierende omfang, især med variation i indholdet af kobber og zink som generelt er højere for gødning fra svin end fra andre dyrearter. Generelt vil hele tungmetallindholdet i husdyrgødning være at finde i askefraktionen efter forbrænding, og der sker derfor omtrent samme opkoncentrering af tungmetaller og f.eks. fosfor. Nogle tungmetaller såsom cadmium kan dog delvis fordampe og derfor især være at finde i flyveaske/filtermateriale fra røgfilter. Der er fundet tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning, især med høje indhold af kobber og zink i aske fra svinegyldfiber og især ved separering med anvendelse af polymerer. Indholdet af cadmium, zink og bly synes generelt væsentligt højere i flyveaske end i bundaske, mens der ikke er væsentlig forskel for kobber og nikkel. Adskillelse af asken i fraktioner udgør dermed en mulighed for at adskille f.eks. hovedparten af fosfor fra hovedparten af cadmium og andre tungmetaller med høj andel i flyveasken.

Viden om diverse miljøfremmede stoffer fra forbrænding af husdyrgødning

Miljøfremmede forbindelser og patogener i husdyrgødning: Der kan i husdyrgødning forekomme en række miljøfremmede og potentielt skadelige stoffer, f.eks. diverse PAH-forbindelser, LAS, antibiotika-rester, blodgørere med hormonlignende egenskaber m.v., ligesom der kan forekomme sygdomsfremkaldende mikroorganismer. Disse forbindelser og mikroorganismer forventes ved forbrænding at blive omdannet til harmløse forbindelser, og der vurderes derfor ikke at være potentielle problemer med disse i asken efter forbrænding af husdyrgødning.

PAH og dioxin fra forbrænding af husdyrgødning: Udover at der kan være PAH-forbindelser i husdyrgødningen, som forventes nedbrudt ved forbrænding, kan der også dannes PAH-forbindelser under forbrænding af biomasse, især ved ufuldstændig forbrænding hvor CO-emissionen også er relativt høj. Der er ikke fundet viden om PAH i aske fra forbrænding af husdyrgødning, men der vurderes at være en potentiel risiko i forbindelse med ufuldstændig forbrænding pga. for lavt tørstofindhold. Risikoen formodes at kunne minimeres enten ved iblanding af støttebrændsel eller tørring af husdyrgødningen før forbrænding. Dioxin kan dannes ved forbrænding af biomasse med indhold af klor. Der er ikke fundet viden om risikoen for dioxin fra forbrænding af husdyrgødning, og risikoen må bl.a. formodes at afhænge af klorindholdet i gødningen, herunder klor fra halm som strøelse eller støttebrændsel.

Viden om emission af NO_x, CO og støv fra forbrænding af husdyrgødning

NO_x-emission: Ved forbrænding omdannes kvælstof i brændslet til enten frit kvælstof eller NO_x, og sidstnævnte bidrager til luftforureningen. Fordelingen mellem frit kvælstof og NO_x afhænger bl.a. af forbrændingsanlæggets indretning og styring, men generelt stiger NO_x-udledningen med stigende kvælstofindhold i brændslet. Ved forbrænding af husdyrgødning forventes derfor at være en risiko for øget NO_x-emission for gødningstyper med højt kvælstofindhold såsom fjerkrægødning. Ved forbrænding af husdyrgødning sammen med støttebrændsel vil NO_x-emissionen formodentlig også være påvirket af andelen af husdyrgødning, og grænseværdien for NO_x i røggas kan i praksis vise sig at være begrænsende for andelen af husdyrgødning i brændselsblandingen. Rensning af NO_x i røggas er dog mulig.

CO-emission: Emission af CO er generelt knyttet til for lav forbrændingstemperatur og ufuldstændig forbrænding, og stor CO-emission kan derfor også indikere risiko for emission af f.eks. PAH. De få hidtidige undersøgelser af forbrænding af husdyrgødning har generelt vist lave emissioner af CO. Generelt er der dog kun begrænset viden om CO-emissionen fra forskellige typer husdyrgødning.

Støv-emission: Støvemission fra forbrænding af gyllefiber synes at være større end ved forbrænding af ren halm, hvorfor der ved forbrænding af gyllefiber kan være behov for røgrensning med cyklon og pose- eller elektrofilter.

Vurdering i forhold til Bioaskebekendtgørelsen

Lovgivningsmæssige reguleringer i forhold til forbrænding af husdyrgødning: EU's Biproduktforordning giver mulighed for, at husdyrgødning på visse betingelser kan brændes på anlæg mindre end 50 MW eller på et affaldsforbrændingsanlæg godkendt i overensstemmelse med reglerne i Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen. Ligeledes giver husdyrgødningsbekendtgørelsen mulighed for at forbrænde husdyrgødning i et affaldsforbrændingsanlæg eller et anlæg godkendt efter gennemførselsforordningen. Men nyttiggørelse af asken fra forbrændt husdyrgødning (bioaske) til jordbrugsformål er imidlertid endnu ikke endeligt afklaret.

På nuværende tidspunkt reguleres forbrænding af husdyrgødning således efter Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen, mens aske fra forbrænding af halm og træ reguleres af Bioaskebekendtgørelsen.

Bioaskebekendtgørelsen definerer maksimale udbringningsmængder af aske og cadmium i aske fra forbrænding af halm og træ samt maksimale koncentrationer af tungmetallerne cadmium, krom, kviksølv, nikkel og bly i aske på tørstofbasis. Bioaskebekendtgørelsen angiver desuden en grænseværdi for PAH i asken, som er betinget af CO-indholdet i røggassen. Til sammenligning angiver Affald til jord-bekendtgørelsen, der regulerer anvendelse af affald til jordbrugsformål, grænseværdier for de samme tungmetaller samt kobber og zink, og desuden er grænseværdier for cadmium, kviksølv, nikkel og bly angivet på fosforbasis. Det kan være relevant at vurdere aske fra forbrænding af husdyrgødning ud fra grænseværdierne i både Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen. Endelig er mængden af fosfor, der må tilføres jorden i form af f.eks. bioaske, reguleret af 'fosforloftet' i Husdyrgødningsbekendtgørelsen.

Tungmetaller i aske: De fundne litteraturdata for tungmetaller i aske fra husdyrgødning viser, at koncentrationerne af tungmetaller i aske fra de fleste gødningstyper holder sig under grænseværdierne jf. Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen. Dog overskrider aske fra svinegyllefiber Affald til jord-bekendtgørelsens grænseværdier for kobber og zink i en del tilfælde, og i nogle tilfælde overskrider nikkelindholdet grænseværdien i Bioaskebekendtgørelsen. Desuden viser tallene, at hvis aske fra forbrænding af husdyrgødning opdeles i bundaske og flyveaske, vil der kunne være betydelige forskelle i koncentrationen mellem fraktionerne med især højere indhold af cadmium i flyveasken. Hvis der udbringes aske fra husdyrgødning på landbrugsjord svarende til 30 kg fosfor pr. ha pr. år, synes Bioaskebekendtgørelsens grænseværdi på maks. 1 ton aske pr. ha pr. år og maks. 0,8 g cadmium pr. ha pr. år generelt ikke at blive overskredet. Derfor synes udbringning af aske fra husdyrgødning primært at ville være begrænset af fosformængden snarere end askemængden og cadmiummængden. Dog vil grænseværdierne for mængden af aske og cadmium potentielt kunne overskrides på enkeltmarker indenfor bedriften, hvis nogle enkeltmarker tildeles højere fosformængder og andre marker lavere fosformængder end fosforloftet. Desuden vil aske af svinegyllefiber som nævnt kunne have relativt høje koncentrationer af kobber og zink, som kan overskride grænseværdierne angivet i Affald til jord-bekendtgørelsen.

Emission af CO og PAH: Der er relativt få målinger af emission af CO, NO_x og støv fra forbrænding af husdyrgødning, og der er ikke fundet undersøgelser af PAH i aske fra husdyrgødning. Emissionen af CO er i alle tilfælde under Bioaskebekendtgørelsens tærskel for krav om PAH-analyse på 625 mg pr. m³ for forbrænding af halm og i visse tilfælde over tærsklen på 313 mg pr. m³ for forbrænding af træ. Det vurderes, at et højt tørstofindhold og en homogen biomasseblanding er centralt for at minimere udledningen af CO og PAH ved forbrænding af

husdyrgødning. Der er ingen grænseværdier for emission af NO_x og støv i Bioaskebekendtgørelsen, men emissionen er for de fleste værdier over grænseværdierne på hhv. 200 og 10 mg pr. m³ i Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen.

1.2 Forbrændingsforsøg og askeanalyser

Forbrændingsforsøg

Forbrændingstestene er udført i en 30 kW Reka-kedel med vandrerist (HKRST 30). Kedlen er ikke godkendt til affaldsforbrænding, men benytter sig af tilsvarende teknologi og kan forbrænde forskellige brændsler.

Der blev udført 7 forbrændingsforsøg:

- 1 forsøg med forbrænding af rene halmpiller (10% vand).
- 4 forsøg med forbrænding af ren husdyrgødning, enten kyllingemøg (28% vand), tørret briketteret hestemøg (12% vand), tørret sogylle-fiber (33% vand) eller tørret biogas-fiber (43% vand).
- 2 forsøg med forbrænding af enten sogylle-fiber eller biogas-fiber iblandet halmpiller til et samlet vandindhold på 31-35%.

Der er på alle forbrændingsforsøg udtaget 2 askeprøver på nær ved målingerne med de rene fraktioner af sogylle-fiber og biogas-fiber, da de viste sig særligt svære at forbrænde.

Generelt har det været vanskeligt at måle stabilt høje temperaturer i brændkammeret, men for enkelte brændsler har der været temperaturer over 850°C i perioder. Det gælder for hestemøg, biogasfiber med halmpiller samt kyllingemøg, hvor temperaturen har været tæt på eller over temperaturkravet i henhold til krav til affaldsforbrændingsanlæg, men middeltemperaturen har været under 850°C. I alle tilfælde er det dog vurderet, at temperaturen i brændslet på risten har været væsentligt over 850°C. På trods af at forbrændingstemperaturerne (i røggassen) for brændslerne har været lavere end de 850°C, som kræves i affaldsforbrændingsanlæg og anlæg under forordningens regler, vurderes det, at der er opnået en tilstrækkelige forbrænding af substraterne. Derudover vurderes det, at delprøver af asken kan anses som værende repræsentative og sammenlignelige, og som derfor efterfølgende har kunnet analyseres.

Emissionerne ved forbrændingsforsøgene har vist, at i alle tilfælde har målingerne af NO_x og støv været over grænseværdien i Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen. Det er således nødvendigt at anvende nogle af de mulige tiltag til reduktion af disse på anlæggene, som skal afbrænde husdyrgødning. CO og OGC (organic gaseous carbon) vurderes til at kunne reduceres ved at optimere forbrændingen og sikre tilstrækkelig temperatur og opholdstid for røggassen.

De målte emissioner viser, at for det anvendte fyringsanlæg er samfyring med støttebrændsel og røggrensning nødvendig i forbrændingen af alle substrater på nær for tørret og briketteret hestemøg, som viser et potentiale til at kunne forbrændes direkte under forudsætning af tilstedeværelse reduktionssystemer til NO_x og partikler.

Askeanalyser

Analyserne er foretaget på Teknologisk Institut samt på AnalyTech Miljølaboratorium A/S. Der er i alt blevet udtaget 14 askeprøver fra kedlen, og de enkelte prøver er efterfølgende formålet med henblik på at kunne foretage analyserne og sikre, at partiklerne er mindre end 2 mm. Der er foretaget følgende analyser på askefraktionerne:

- Tørstof
- Glødetab
- pH

- Ledningsevne
- Askeindhold på råmaterialet
- Tungmetaller (Hg, Pb, Ni, Cr, Cd, Cu og Zn)
- Sum af PAH (Σ Acenaphthen, Phenanthren, Fluoren, Fluoranthren, Pyren, Benz(b+j+k) fluoranthren, Benzo(a)pyren, Benz(ghi)perylene, Indeno(1,2,3-cd)pyren)
- Kalium
- Totalfosfor
- TOC

Projektet har vist, at de analyserede askefraktioner fra substraterne i alle tilfælde overholder de krav, som er opstillet i Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen.

2. Summary in English

This project has focused on combustion of animal manure for energy production with special emphasis on constituents in ash from the combustion. The project includes a literature review and a series of experimental trials with combustion of various types of animal manure.

2.1 Literature review

A literature review has illuminated the available knowledge about combustion of animal manure. The review includes an overview of types and quantities of animal manure in Denmark, possible pretreatment technologies for animal manure prior to combustion, knowledge about nutrients and heavy metals in ash from animal manure, knowledge about environmentally hazardous constituents from combustion of animal manure, knowledge about emission of CO and NO_x from combustion of animal manure as well as an evaluation in relation to the Danish legislation on bio-ash.

Types of animal manure and relevance for combustion

Types and quantities of animal manure: The total annual production of animal manure in Denmark is approx. 43 million ton, with 96% coming from cattle and pig production. Slurry and deep litter constitute 90% and 9% of the total quantity, respectively. Slurry has relatively low dry matter content, especially for pig slurry, whereas deep litter from pig and cattle typically has a dry matter content around 30%, and deep litter from poultry may have a dry matter content in the range 50-70%. The fiber solid fraction from separation of slurry typically contains 30% dry matter. Therefore, most types of animal manure, therefore, have too low dry matter content for proper combustion without further drying or mixing with drier biomass as support-fuel for co-combustion. For poultry manure and horse manure, however, the dry matter content may in some cases be sufficiently high for combustion.

Incentives for combustion: From an agricultural point of view, combustion of animal manure will often be related to issues regarding nutrients in the manure and the nutrient status in the local area where animal production occurs. In particular, a surplus of phosphorus in areas with intensive animal production may constitute an incentive for combustion or other types of 'condensation' of nutrients, which may lower the costs for transport of phosphorus to other areas with phosphorus deficit. For instance, combustion may be relevant for poultry manure due to a high phosphorus content. Combustion may also be relevant for the solid fraction from separation of digestate from biogas production, not least for biogas plants using other residual biomasses with high content of phosphorus. Combustion of horse manure may be relevant due to a relatively high dry matter content, and because facilities with riding horses typically don't have any land where the manure can be applied for fertilizing purposes. Finally, there may be an economic incentive for combustion of animal manure if the heat can be used on-farm.

Relevant pretreatment technologies for animal manure prior to combustion

Prior to combustion, it may be relevant and necessary with various types of pretreatment of animal manure, with a primary goal being to increase the dry matter content. This increases the effective heating value and can ensure a proper combustion process with a temperature of minimum 850°C and reduce the risk of emission of undesirable constituents. Another purpose of the treatment may be to increase the content of nutrients in certain fractions. Four main pretreatment principles for animal manure are reviewed.

Separation: Various technologies can be applied for separation of slurry or digestate into a solid fiber fraction and a liquid fraction, where a large part of the dry matter and phosphorus will be present in the solid fraction. The dry matter content in the solid fraction is typically in the range 25-35%. The heating value of the solid fraction after drying is slightly higher for cattle slurry than for pig slurry and digestate and lowest for mink slurry. By screw pressing or centrifugation by a decanter centrifuge, the concentration (on dry matter basis) of the heavy metals copper, zinc and cadmium is reduced in the solid fraction, whereas flocculation and precipitation by use of polymers causes an increase. In general, pathogenic bacteria can be expected to be present both in the solid fraction and the liquid fraction.

Anaerobic digestion in biogas plants: By anaerobic digestion in biogas plants, 60-80% of the organic matter in animal manure is typically converted to methane and carbon dioxide etc. The heating value of the remaining organic matter will depend on the biomass, but due to a higher lignin content, the heating value may be on the same level as before digestion despite a higher ash content. Anaerobic digestion of animal manure can result in a higher concentration of heavy metals but also increases the content of ammonia nitrogen.

Drying: By drying animal manure, water is removed, and the effective heating value is increased, but the energy consumption for drying reduces the net energy yield. Moreover, it is important to handle the ammonia nitrogen, that is liberated by drying.

Mixing with support-fuel: Mixing animal manure with drier biomass can increase the dry matter content and, hence, improve the combustion. On experimental basis, good experience has been achieved by mixing animal manure with either straw or wood chips.

It will often be relevant to apply combinations of different pretreatment technologies prior to combustion of animal manure, e.g. anaerobic digestion followed by separation and separation combined with either drying or mixing with support fuel. The optimal combination of type of animal manure and type of pretreatment will presumably depend on the specific conditions.

Knowledge about nutrients and heavy metals in ash from combustion of animal manure

Content of plant nutrients in ash: By combustion of animal manure, nearly all nitrogen is lost, and a proportion of the sulfur will also evaporate. In contrast, the main part of phosphorus, potassium and other important plant nutrients will remain in the ash. The content of nutrients in ash will vary considerably between manure types, for instance with a higher content of phosphorus in ash from pig slurry than from cattle slurry and with a high content of potassium in ash from poultry manure. In some combustion plants, ash is separated in different fractions, and the distribution between bottom ash and fly ash may vary significantly. The concentration of potassium and sulfur is higher in fly ash than in bottom ash, the concentration of phosphorus is slightly higher in fly ash, and the concentration of calcium and magnesium is higher in bottom ash. pH is generally high in ash, and the electric conductivity may also be high depending on the type of manure.

Plant availability of nutrients in ash: The availability of nutrients in ash from animal manure varies between the elements, with relatively high availability of potassium and low availability of phosphorus, calcium and magnesium. The availability of phosphorus decreases with increasing combustion temperature, and the availability is lower in bottom ash than in fly ash. Hence, ash from combustion of animal manure is not suitable as a starting fertilizer, but the long-term fertilization effect may be satisfactory, since plant availability increases when ash reacts with particularly acidic soil.

Melting point for ash: The melting behavior of ash from animal manure varies between manure types with high melting point for poultry manure and lower for e.g. horse manure and solid fiber fraction from degassed cattle slurry which can be a challenge for these types of fuel.

Heavy metals: Animal manure contains heavy metals to various degrees, especially with large variation in the content of copper and zinc which is generally higher in pig manure than in manure from other animals. In general, the total quantity of heavy metals in the animal manure will be in the ash after combustion and, hence, the concentration of heavy metals and e.g. phosphorus will increase at the same magnitude. However, some heavy metals such as cadmium can partly evaporate and will, therefore, be present in fly ash from other material from the combustion flue gas. Heavy metals have been found in ash from combustion of animal manure, particularly with high levels of copper and zinc in ash from pig slurry fiber and particularly with separation by use of polymers. The content of cadmium, zinc and lead appears to be higher in fly ash compared to bottom ash whereas there is no marked difference for copper and nickel. Separation of ash in different fractions may, hence, provide a means for separating the main part of phosphorus in the bottom ash from the main part of cadmium and other heavy metals with higher share in the fly ash.

Knowledge about various hazardous constituents from combustion of animal manure

Xenobiotic compounds and pathogens: Animal manure may contain a range of xenobiotic and potentially hazardous compounds such as various PAH, LAS, antibiotic residues, plasticizers with hormone-like properties etc. as well as potentially pathogenic microbes. These compounds and microbes are expected to be converted to harmless compounds during combustion and are, therefore, not expected to be present in the ash from combustion of animal manure.

PAH and dioxin from combustion of animal manure:

In addition to PAH compounds in animal manure, which are expected to be degraded during combustion, PAH compounds can also be formed during combustion of biomass, particularly during incomplete combustion where the emission of CO is also relatively high. No data have been found regarding PAH in ash from combustion of animal manure, but it is estimated that there may be a potential risk during incomplete combustion when using manure with low dry matter content. This risk is expected to be reduced by mixing with support fuel or drying of the manure prior to combustion. Dioxin can be formed by combustion of biomass containing chlorine. No information is found about the risk of dioxin from combustion of animal manure, and the risk is expected to depend on the content of chlorine in the manure, including chlorine from straw used either as bedding material or as support fuel.

Knowledge about emission of NO_x, CO and dust from combustion of animal manure

NO_x emission: During combustion, nitrogen in the fuel is converted to either free nitrogen or NO_x with the latter contributing to air pollution. The distribution between free nitrogen and NO_x depends on various factors including the construction and management of the combustion plant but, in general, the emission of NO_x increases with increasing nitrogen content in the fuel. Therefore, combustion of animal manure is expected to cause a risk of increased NO_x emission, at least for manure types with high nitrogen content. During co-combustion of animal manure and support fuel, the NO_x emission is most likely affected by the ratio between the two fuels and, the limit for NO_x emission may in practice prove to be the limiting factor for the proportion of animal manure used in the fuel mixture. However, reduction of NO_x in flue gas is possible.

CO emission: Emission of CO is generally related to low combustion temperature and incomplete combustion, and high CO emission may, therefore, also indicate a risk of emission of PAH. The very few studies that have been carried out with combustion of animal manure has generally shown low emissions. However, only very little is known about emission of CO from various types of animal manure.

Dust emission: Emission of dust from combustion of slurry fiber fraction appears to be larger than from combustion of pure straw and, thus, there may be a need for flue gas cleaning.

Evaluation in relation to the legislation for bio-ash

Legislation for combustion of animal manure: EU's regulation of by-products allows combustion of animal manure within certain conditions on combustion plants below 50 MW or on plants approved for combustion of waste. Moreover, the Danish legislation on animal manure allows combustion of manure in combustion plants. However, utilization of ash from combusted animal manure (bio-ash) for soil amendment is not fully clarified.

At present, combustion of animal manure is, therefore, regulated by legislation for combustion of waste, whereas ash from combustion of straw and wood is regulated by legislation for bio-ash. The latter defines maximum quantities to apply of ash and cadmium from combustion of straw and wood as well as maximum concentrations of the heavy metals cadmium, chrome, mercury, nickel and lead in ash (on dry matter basis). The legislation for bio-ash also defines thresholds for CO concentration in flue gas above which analysis of PAH in ash is required. For comparison, the legislation for agricultural application of waste/sludge defines limits for the same heavy metals as well as copper and zinc and, moreover, the limits for cadmium, mercury, nickel and lead is also given per kg of phosphorus. It may be relevant to evaluate ash from combustion of animal manure in relation to the limits given for bio-ash as well as for waste/sludge. Moreover, the quantity of phosphorus that can be applied to agricultural land is regulated by legislation for animal manure.

Heavy metals in ashes: The values found for heavy metals in ash from combustion of animal manure show, that the level is below the legislative limits for most types of manure. However, ash from pig slurry fiber exceeds the limits for copper and zinc in a number of cases and also for nickel in some cases. Moreover, the figures show, that if ash is separated in bottom ash and fly ash, considerable differences can be obtained in the concentration, particularly with higher cadmium concentration in fly ash. If ash from animal manure is applied at a quantity corresponding to 30 kg of phosphorus per hectare per year, the limit of maximum 1 ton of ash and maximum 0.8 g of cadmium per hectare per year is generally not exceeded. Therefore, application of ash from animal manure may primarily be limited by the quantity of phosphorus rather than the quantity of ash and cadmium. However, the maximum quantities of ash and cadmium may be exceeded on single fields within a farm if the allowed average quantity of phosphorus is not distributed evenly on fields within the farm. Moreover, ash from pig slurry fiber may have high concentrations of copper and zinc, which may exceed the limits in the legislation for waste/sludge.

Emission of CO and PAH: There are only limited measurements of emission of CO, NO_x and dust from combustion of animal manure, and no investigations of PAH in ash from animal manure has been found. The emission of CO is in all studies below the threshold for requirement of PAH analysis of 625 mg per m³ for bio-ash from straw and in some cases above the limit of 313 mg per m³ for ash from tree. It is estimated that a high dry matter content in the manure and a homogeneous biomass mixture is paramount for minimizing the emission of CO and PAH from combustion of manure. There are no legislative limits for emission of NO_x and dust in the legislation for bio-ash, but most of the found values are above the limits of 200 and 10 mg per m³ given in the legislation for combustion of waste.

2.2 Combustion trials

Combustion trials

The combustion tests were carried out in a 30 kW Reka boiler with a moving grate (HKRST 30). The boiler is not approved for waste incineration but uses similar technology and is able to burn different fuels.

7 combustion tests were carried out:

- 1 test with combustion of pure straw pellets (10% water).
- 4 tests with combustion of pure manure, either chicken manure (28% water), dried and briquetted horse manure (12% water), dried sow fiber manure (33% water) or dried biogas fiber (43% water).
- 2 trials with combustion of either sow fiber manure or biogas fiber mixed with straw pellets having a total water content of 31-35%.

Two ash samples were sampled in all combustion experiments, except for the measurements with the pure fractions of sow fiber manure and biogas fiber, as they proved particularly difficult to burn.

In general, it has been difficult to measure a stable high temperature in the combustion chamber. For periods of time, the temperature for individual fuels has been above 850°C. This applies to horse manure, biogas fiber with straw pellets and chicken manure, where the temperature has been close to the temperature requirement for combustion of waste. Still, the average temperature has been below 850°C. In all cases, however, it has been estimated that the temperature of the fuel on the grate has been significantly above 850°C. Despite the fact that combustion temperatures (in the flue gas) of the fuels have been lower than the 850°C required in waste incineration plants and the act governing waste incineration plants, it is assessed that sufficient combustion of the substrates has been achieved to ensure a representative ash product which has been analyzed subsequently.

The emissions from the incineration tests have shown that the measurements of NO_x and dust have exceeded the limit value in the Danish Act regarding Waste Incineration in all cases.

Thus, it is necessary to have measures that reduce emissions at plants which will burn these substrates. It has been assessed that CO and OGC (organic gaseous carbon) can be reduced by optimizing combustion and ensuring sufficient temperature and residence time for the flue gas.

The measured emissions show that for the applied test plant, co-firing and smoke purification are necessary when burning all substrates except for dried and briquetted horse manure, which shows a potential to be combusted directly, provided that NO_x and particulate reduction systems are present.

Ash analysis

Analyses have been performed at Danish Technological Institut and at AnalyTech Miljølaboratorium A/S. A total of 14 ash samples were taken from the boiler. Subsequently, the individual samples were milled in order to carry out the analyzes and ensure that the particles were less than 2 mm. Following analysis of ash fractions have been carried out:

- Dry matter
- Loss of ignition
- pH
- Conductivity
- Ash content of raw material

- Heavy metals (Hg, Pb, Ni, Cr, Cd, Cu og Zn)
- Sum of PAH (Σ Acenaphthen, Phenanthren, Fluoride, Fluoranthren, Pyren, Benz(b+j+k) fluoranthren, Benzo(a)pyren, Benz(ghi)perylene, Indeno(1,2,3-cd)pyren)
- Potassium
- Total phosphor
- TOC

The project has shown that the analyzed ash fractions from the substrates in all cases comply with the requirements laid down in the Bio-ash Act and the Waste to soil Act.

3. Indledning

Denne rapport udgør afrapporteringen af 'Projekt om forbrændt husdyrgødning', der er gennemført i perioden september til december 2019. Projektet er finansieret af Miljøstyrelsen, der udbød projektopgaven i juli 2019, og projektet er gennemført af Teknologisk Institut. Projektet er gennemført ud fra kravsspecifikationen fra Miljøstyrelsen (se nærmere i afsnittet Opgavebeskrivelse) og omfatter en litteraturgennemgang, en forsøgsserie med forbrænding af forskellige typer af husdyrgødning som rene fraktioner eller i blanding med halmpiller og analyser på den frembragte aske samt sammenfattende konklusion ud fra litteratur og forsøg.

Der har til projektet været knyttet en følgegruppe bestående af følgende:

- Erik Ervolder Olesen, HedeDanmark – her dog som repræsentant for Brancheforeningen Genanvendt Biomasse.
- Henrik Bang Jensen, Landbrug og Fødevarer
- Simon Skov, Københavns Universitet
- Morten Carlsbæk, Dakofa
- Hans Kjær, Miljø- og Fødevareministeriet
- Ole Moeslund, Miljøstyrelsen, Erhverv
- Linda Bagge, Miljøstyrelsen, Cirkulær Økonomi og Affald
- Christian Hauschildt, Miljøstyrelsen, Cirkulær Økonomi og Affald
- Toke Bang-Andreasen, Miljøstyrelsen, Cirkulær Økonomi og Affald

Som repræsentanter for Teknologisk Institut har medvirket projektets leder Jørgen Hinge samt Søren Ugilt Larsen.

Følgegruppen har afholdt møde 11/10 2019 (afbud fra Morten Carlsbæk og Hans Kjær), hvor projektets relevans og fremgangsmåde blev drøftet. Følgegruppen har endvidere haft mulighed for at kommentere på denne rapport. Sideløbende med følgegruppens kommentering er der lavet faglig kvalitetssikring af rapporten af Torkild Birkmose, SEGES.

4. Baggrund

Forbrænding af husdyrgødning har været overvejet gennem mange år, bl.a. med stor interesse i årene omkring 2005, hvilket førte til den tværministerielle 'Rapport fra arbejdsgruppen om afbrænding af fraktioner af husdyrgødning' (Arbejdsgruppen, 2005) og en rapport fra Danmarks Miljøundersøgelser vedr. 'Miljøkonsekvenser ved afbrænding af husdyrgødning med sigte på energiidnyttelse' (Schou et al., 2006). Forbrænding af husdyrgødning har dog kun været praktiseret i meget begrænset omfang i Danmark, men der er nu fornyet interesse for emnet. Interessen skyldes bl.a. udfordringer med overskud af fosfor i områder med intensiv husdyrproduktion som følge af indførelse af 'fosforloftet' i 2017 (Birkmose, 2017; Retsinformation.dk, 2019b). Dette medfører et ønske om at kunne opkoncentrere fosfor og andre næringsstoffer, der gør det praktisk og økonomisk muligt at transportere denne ressource til et område med mangel på næringsstoffer. Forbrænding af husdyrgødning udgør én af mulighederne for at opkoncentrere fosfor, da askefraktionen kun udgør en lille del af den oprindelige mængde husdyrgødning.

Lovgivningsmæssigt er der mulighed for, at husdyrgødning på visse betingelser kan forbrændes på anlæg mindre end 50MW eller på et affaldsforbrændingsanlæg, der er godkendt jf. reglerne i Bekendtgørelse om anlæg der forbrænder affald ('Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen') (EUR-Lex, 2017; Retsinformation.dk, 2017). Aske fra forbrænding af halm og træ kan anvendes til jordbrugsformål, jf. Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål ('Bioaskebekendtgørelsen') (Retsinformation.dk, 2019a). Derimod er der ikke afklaring mht. nyttiggørelse af aske fra forbrændt husdyrgødning, og dette projekt har til formål at bidrage til denne afklaring, både mht. indhold af plantenæringsstoffer såvel som uønskede stoffer som tungmetaller m.m. Resultaterne af projektet skal bidrage med opsamling af eksisterende viden fra litteraturen samt resultater fra nye forbrændingsforsøg med forskellige typer af husdyrgødning. Tilsammen skal dette bidrage til grundlaget for en evt. regulering af nyttiggørelse af aske fra forbrænding af husdyrgødning til jordbrugsformål.

Forgasning/pyrolyse af husdyrgødning kan udgøre et alternativ til forbrænding, og restproduktet biokoks eller 'biochar' vil kunne adskille sig væsentligt fra aske fra forbrænding. Der er betydelig interesse for mulighederne ved anvendelse af biochar til jordforbedringsmiddel, og det er særdeles relevant, hvad biochar fra forgasning af forskellige typer husdyrgødning indeholder. Dette ligger imidlertid udenfor formålet med denne rapport.

5. Opgavebeskrivelse

5.1 Delopgave 1 - litteraturstudie

Litteraturstudiet har til formål at sammenfatte nuværende viden om indhold af tungmetaller og miljøfremmede stoffer i aske fra forbrændt husdyrgødning. Desuden er formålet at belyse, hvorledes behandlingsprocesser forud for forbrænding af husdyrgødning påvirker koncentrationen af indholdsstoffer som f.eks. tungmetaller og miljøfremmede stoffer i aske fra forbrændt husdyrgødning. Der skal tages udgangspunkt i danske forhold, dvs. f.eks. viden om husdyrgødning fra Danmark og aske fra danske forbrændingsanlæg, men der skal også inkluderes international viden på området, så længe denne viden er sammenligneligt med danske forhold. Endvidere skal litteraturstudiet inkludere en afgrænsning af, hvilke typer husdyrgødning der er relevante for forbrænding til energiformål i Danmark.

Litteraturstudiet skal – i det omfang der findes viden herom – bl.a. afdække viden om følgende faktorer vedr. aske og emissioner fra forbrænding af de mest relevante typer af husdyrgødning:

- Betydning af fodring og strøelse mv.
- Betydning af forskellige typer forbehandling forud for forbrænding.
- Betydning af samforbrænding med halm, flis eller anden biomasse som støttebrændsel, inkl. betydning af diskussion af fordele og ulemper ved samforbrænding.
- Fordeling af tungmetaller og miljøfremmede stoffer i hhv. bundaske og flyveaske.
- Muligt indhold af andre miljøfremmede stoffer i asken såsom medicinrester, hormonforstyrrende stoffer og patogener.
- Emissioner af CO, NO_x mm. via røggas fra forbrænding af husdyrgødning.

På grundlag af litteraturstudiet skal det vurderes, om Bioaskebekendtgørelsens grænseværdier for tungmetaller og miljøfremmede stoffer i bioaske fra halm og træflis til jordbrugsformål er overførbare til aske fra husdyrgødning. Desuden skal det vurderes, om andre stoffer end de i Bioaskebekendtgørelsen oplyste vurderes relevante at inkludere i forhold til regulering af aske fra husdyrgødning til jordbrugsformål.

5.2 Delopgave 2 - forbrændingsforsøg

Forbrændingsforsøget har til formål at forbrænde udvalgte typer af husdyrgødning og analyserer af askeprøver herfra – at bidrage med ny viden, der kan supplere den nuværende viden. Endelig er det formålet at give en vurdering af, om de gældende grænseværdier for nyttiggørelse af bioaske fra halm og flis til jordbrugsformål jf. bioaskebekendtgørelsen kan anvendes i forhold til aske fra forbrændt husdyrgødning.

I hvert forbrændingsforsøg måles der følgende på kedlen:

- Virkningsgrad på kedlen
- Røgtemperatur
- CO
- CO₂
- OGC
- NO_x
- Partikelemission (filtermetode)

Asken fra de forskellige forsøg vil blive udtaget på en sådan måde, at det ikke forstyrrer forbrændingen og dermed kan påvirke processen. Fra asken indsamlet under en given test vil der efterfølgende blive udtaget repræsentativ prøve til analyse. Prøven opbevares i åbne beholdere, mens den køles og placeres efterfølgende i lukket beholder ifm. transport til analyselaboratoriet.

Der er foretaget følgende analyser på askefraktionerne

- Tørstof
- Glødetab
- pH
- Ledningsevne
- Askeindhold i råmaterialet
- Tungmetaller (Hg, Pb, Ni, Cr, Cd, Cu og Zn)
- Sum af PAH (Σ Acenaphthen, Phenanthren, Fluoren, Fluoranthren, Pyren, Benz(b+j+k) fluoranthren, Benzo(a)pyren, Benz(ghi)perylene, Indeno(1,2,3-cd)pyren)
- Kalium (K)
- Totalfosfor (P)
- TOC

På grundlag af forbrændingsforsøget skal det vurderes, om de gældende grænseværdier for nyttiggørelse af bioaske fra halm og flis til jordbrugsformål jf. Bioaskebekendtgørelsen kan anvendes i forhold til aske fra forbrændt husdyrgødning.

6. Litteraturstudie

6.1 Metodebeskrivelse og strukturering

Litteratursøgning

I forbindelse med litteraturstudiet er der søgt viden via forskellige kanaler, især med søgning via Science Direct, Google Scholar, Google og Landbrugsinfo.

Ved søgninger på engelsk er der anvendt forskellige synonymer for husdyrgødning (*slurry, manure, degassed fiber, biogas digestate, deep litter, dung*) i kombination med synonymer for forbrænding (*combustion, burning, incineration, co-combustion, co-firing, support fuel*). Disse søgeord er desuden kombineret med forskellige synonymer for husdyrarterne (*pig, swine, cow, cattle, calf, calves, chicken, poultry, hen, broiler, horse, mink, sheep, goat*). Der er også foretaget kombinationssøgninger, hvori der indgår synonymer for aske (*ash, bottom ash, fly ash*), ligesom der er foretaget søgninger i kombination med Danmark (*Denmark*). I forbindelse med forbehandling af husdyrgødning er der foretaget søgninger med synonymer for husdyrgødning kombineret med synonymer for forbehandling (*separation, solid-liquid separation, anaerobic digestion, AD, biogas, drying, energy consumption*), ligesom der er indgået forskellige ord for relevante indholdsstoffer m.m. (*dry matter, total solid, heavy metals, medicine, phosphorous, P, environmentally harmful substances, pathogen, hormone disrupting drugs, drug residues, endocrine disrupters*).

Ved søgninger på dansk er der anvendt søgeord som *forbrænding af husdyrgødning, afbrænding af husdyrgødning og aske fra husdyrgødning*.

Relevante kilder er derefter udvalgt og gennemgået i forhold til fokuspunkterne i opgavebeskrivelsen. Det er så vidt muligt angivet, om der er tale om viden fra danske eller udenlandske undersøgelser.

Struktur af litteraturgennemgangen

Den efterfølgende litteraturgennemgang er struktureret i følgende hovedafsnit:

6.2 Typer af husdyrgødning: Gennemgang af hovedkategorier af husdyrgødning i Danmark inkl. årlige mængder og typisk tørstofindhold samt en vurdering af incitament og potentialer for afbrænding af de forskellige hovedtyper af husdyrgødning.

6.3 Relevante forbehandlingsmetoder for husdyrgødning før forbrænding: Kort begrundelse for behov og muligheder for forbehandling før forbrænding samt gennemgang af forbehandlingsmetoderne 1) separering i fiberfraktion og væskefraktion, 2) afgang i biogasanlæg, 3) tørring samt 4) iblanding af støttebrændsel. Herunder viden om effekten af forbehandling på indholdet af tungmetaller m.m.

6.4 Viden om indhold af næringsstoffer og tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning: Gennemgang af relevant viden om indhold af plantenæringsstoffer i aske og deres tilgængelighed, askesmeltepunkt samt indhold af tungmetaller i aske inkl. forskelle mellem bundaske og flyveaske.

6.5 Viden om diverse miljøfremmede stoffer fra forbrænding af husdyrgødning: Overblik over uønskede stoffer i husdyrgødning såsom PAH, medicinrester og patogener samt risikoen for indhold af disse efter forbrænding af husdyrgødning, samt risiko for dannelse af PAH og dioxin ved forbrænding af husdyrgødning.

6.6 Viden om emissioner af CO og NO_x fra forbrænding af husdyrgødning: Gennemgang af viden om uønskede stoffer i røggassen med fokus på CO og NO_x.

6.7 Vurdering i forhold til Bioaskebekendtgørelsen: Gennemgang af grænseværdier i Bioaskebekendtgørelsen og andre relevante bekendtgørelser såsom Affald til jord-bekendtgørelsen, overblik over fundne niveauer af tungmetaller i aske og emissioner af CO og NO_x fra forbrænding af husdyrgødning og sammenligning med grænseværdier.

6.8 Konklusion fra litteraturstudiet.

Hvor det er fundet relevant, er der i de enkelte afsnit lavet korte beskrivelser og gengivet data fra relevante studier. Centrale data vedr. indhold af tungmetaller samt emissioner af CO og NO_x er opsummeret i afsnittet Vurdering i forhold til Bioaskebekendtgørelsen.

6.2 Typer af husdyrgødning

Dette afsnit beskriver hovedkategorierne af husdyrgødning i Danmark mht. årlige mængder og typisk tørstofindhold. På baggrund af disse to parametre samt andre relevante faktorer laves en afgrænsning af hvilke typer af husdyrgødning, der er relevante til forbrænding til energiformål.

Typer og mængder af husdyrgødning i Danmark

Produktionen af husdyrgødning i Danmark kan opgøres ud fra husdyrproducenters indberetninger af gødningsregnskaber til Landbrugsstyrelsens database 'Gødnings- og Husdyrindberetningen'. Birkmose et al. (Birkmose et al., 2019) har lavet en samlet opgørelse af husdyrgødning baseret på udtræk fra databasen for planperioden 2016-2017, og datagrundlaget vurderes at være forholdsvis pålideligt, da der ved Landbrugsstyrelsens fysiske kontrol findes relativt få fejl. Der er i opgørelsen ikke fraregnet den mængde husdyrgødning, som tabes af dyrene under afgræsning (Birkmose et al., 2019), men dette formodes ikke at ændre væsentligt på de generelle størrelsesordener.

I opgørelsen indgår ikke husdyrgødning fra får, geder og hjorte, men i en tidligere opgørelse baseret på planperioden 2012-2013 udgjorde husdyrgødning fra disse arter ca. 0,5% af mængden fra de øvrige husdyrarter i opgørelsen (Birkmose et al., 2015). Der er derfor tale om meget små mængder husdyrgødning fra disse arter, og denne ressource vurderes at have meget lille betydning i forhold til forbrænding til energiformål.

Den årlige produktion af husdyrgødning er vist i tabel 1 med fordeling på husdyrarter og på forskellige gødningstyper. Den samlede produktion af husdyrgødning udgør iflg. opgørelsen knap 43 mio. tons husdyrgødning. Langt hovedparten af husdyrgødningen stammer fra kvæg og svin (96% tilsammen), mens andelen fra fjerkræ, pelsdyr og heste er væsentligt mindre. Som gennemsnit af dyrearterne udgør gylle 90% af husdyrgødningen, mens dybstrøelse udgør 9%, fast staldgødning 1% og ajle udgør ca. 1%. Dybstrøelse består af en blanding af strøelse såsom halm og fast staldgødning og ajle, dvs. det kan opfattes som gylle 'fortyndet' med strøelse med højere tørstofindhold. Fordelingen mellem gødningstyper afhænger meget af husdyrarten, og mens gylle er den dominerende type for kvæg og især svin, udgør dybstrøelse hovedparten af gødningen fra fjerkræ og heste.

TABEL 1. Samlet årlig produktion af husdyrgødning af lager i Danmark opdelt på husdyrart og gødningstype. Der er ikke fraregnet den mængde husdyrgødning, som tabes af dyrene under græsning. Tallene er baseret på udtræk fra Landbrugsstyrelsens database for Gødnings og Husdyrindberetning (GHI) for planperioden 2016-2017, og mængderne er angivet i 1.000 tons gødning (friskvægt). (Fra (Birkmose et al., 2019).

Husdyrart	Gylle	Dyb-strøelse	Fast staldgødning	Ajle	I alt	Pct.
Kvæg	17.895	2.922	209	236	21.262	50
Svin	19.385	142	11	38	19.575	46
Fjerkræ	5	238	64	0	307	1
Pelsdyr	1.270	183	0	0	1.453	3
Heste	0	217	0	0	217	1
I alt	38.555	3.701	284	274	42.814	100*
Pct.	90	9	1	1	100*	-

* Summen af procentvis fordeling på dyrearter og gødningstyper giver 101 jf. originalkilden.

Tørstofindholdet i husdyrgødningen er af væsentlig betydning for den efterfølgende anvendelse, og ikke mindst er det afgørende med et højt tørstofindhold, hvis gødningen skal anvendes til forbrænding. Der findes normtal for indholdet af tørstof og næringsstoffer i forskellige typer af gødning fra forskellige husdyrarter (Lund et al., 2019). Normtallene for tørstofindhold er dog ikke nødvendigvis dækkende, dels pga. usikkerhed i beregningsmodellen, og dels fordi tørstofindholdet er beregnet af lager og ikke af stald (Birkmose et al., 2015).

I tabel 2 er vist normtal for tørstofindhold i forskellige typer af husdyrgødning i Danmark. Der er betydelig variation i tørstofindhold mellem forskellige husdyrarter og endda mellem aldersgrupper indenfor dyrearterne. Generelt er der lavere tørstofindhold i gylle fra svin end i gylle fra kvæg, og det laveste tørstofindhold findes generelt i gylle fra søer og smågrise med angivne niveauer mellem 4,4 og 5,5%. For gylle fra slagtesvin er der angivet tørstofindhold i niveauet 6,1-6,6%, mens der for gylle fra køer er angivet et niveau på 6,9-8,7%.

Fast staldgødning har et højere tørstofindhold end gylle, da urinen er opsamlet separat som ajle, og normtal for tørstofindholdet i fast staldgødning varierer mellem 18,2 og 40% (tabel 2). Dybstrøelse har det højeste tørstofindhold af gødningstyperne, fordi der er iblandet strøelse såsom halm. Tørstofindholdet i dybstrøelse fra kvæg og grise er typisk omkring 30%, mens det for høns og slagtekyllinger er væsentligt højere med niveauer mellem 48% og 63,3%. Andre kilder angiver tørstofindhold på 60-70% for fjerkrægødning (Miljøstyrelsen, 2011). For dybstrøelse fra heste er der angivet et tørstofindhold på 26%. Tørstofindholdet i dybstrøelse vil dog afhænge særdeles meget af strøelsesintensiteten. Fiberfraktion efter separering af husdyrgødning, der ikke er angivet i normtallene, angives andetsteds at have et tørstofindhold på ca. 30% (Birkmose et al., 2015).

TABEL 2. Tørstofindhold i typer af husdyrgødning i Danmark af stald. Der er angivet 'normtal' efter (Lund et al., 2019). Normtal repræsenterer konventionel husdyrproduktion, mens økologisk produktion ikke er repræsenteret.

Husdyrart	Normtal		
	Gylle	Dybstrøelse	Fast staldgødning
Køer	6,9-8,7	28,7-30,0	20
Kvier og stude	11,0-12,3	30	18,2
Søer	4,5-5,5	33	23
Slagtesvin	6,1-6,6	33	23
Smågrise	4,4-5,0	33	23
Høns	12,0	48,0-63,3	40
Slagtekyllinger	-	48	40
Mink	6,9-12,0	35	-
Heste	-	26	-

Relevans af forbrænding af forskellige husdyrgødningstyper

Ud fra et forbrændingsteknisk perspektiv har forbrænding ingen relevans for gylle uden en forudgående forbehandling (se efterfølgende afsnit om relevante forbehandlingsmetoder), da tørstofindholdet er for lavt. Fiberfraktionen efter separering har et væsentligt højere tørstofindhold, hvilket kan gøre forbrænding mere relevant, men med et typisk tørstofindhold på ca. 30% i fiberfraktion er der dog stadig tale om et for lavt tørstofindhold til forbrænding uden yderligere

tørring eller iblanding af tørrere biomasse som støttebrændsel (Westborg et al., 2010). Dybstrøelse fra kvæg og svin har pga. strøelsesmateriale et højere tørstofindhold sammenlignet med gylle, men med et typisk tørstofindhold på ca. 30% er der også her tale om et for lavt tørstofindhold til umiddelbar anvendelse til forbrænding. Dybstrøelse fra fjerkræ har væsentligt højere tørstofindhold på typisk ca. 50%, hvor forbrænding kan være teknisk mulig uden yderligere tørring eller tilsætning af anden biomasse, hvilket også er påvist i forbrændingstests (Westborg et al., 2010). Tidligere har der været erfaring med forbrænding af fjerkrægødning og hestegødning (Birkmose & Zinck, 2008).

Ved hestehold anvendes ofte en række strøelsesmaterialer såsom halm, halmpiller, træspån og træflis m.m. (Hadin et al., 2016), og disse materialer vil være med til at øge tørstofindholdet i dybstrøelsen, som dermed kan variere fra typisk mellem 30 og 50% tørstof (Hadin & Eriksson, 2016). Dybstrøelse fra heste med en blanding af hestegødning og træspåner har vist at være et udmærket brændsel til forbrænding (Lundgren & Pettersson, 2009). Ved anvendelse af hestegødning til energiformål kan den geografiske spredning af bedrifter med heste og den generelt begrænsede størrelse på bedrifter med heste dog udgøre en barriere i forhold til effektiv logistik, da det kan kræve relativt stor transport at få indsamlet tilstrækkelige mængder. (Svanberg et al., 2018).

Ud fra et landbrugsmæssigt synspunkt vil forbrænding af husdyrgødning ofte være knyttet til forhold omkring næringsstofindhold i gødningen og næringsstofsituationen i nærområdet omkring husdyrproduktionen. Tidligere har kvælstofoverskud på ejendommen udgjort et vigtigt incitament for forbrænding af husdyrgødning f.eks. fra fjerkræproduktion, da kvælstoffet i den afbrændte gødning kan fratrækkes i gødningsregnskabet (Mikkelsen & Bahrndorff, 2009; Petersen & Sørensen, 2006). I dag er ikke mindst fosforpuljen i husdyrgødning blevet af større betydning efter vedtagelse af en ny fosforregulering med 'fosforloft', der blev vedtaget i 2017, og som har til hensigt at mindske risikoen for fosfortab til vandmiljøet (Birkmose, 2017). Fosforloftet definerer hvor meget fosfor, der må udbringes pr. ha pr. år, og fosforloftet afhænger bl.a. af husdyrtypen. For planperioden 2019-2020 er loftet på 35 kg fosfor pr. ha for fjerkræ og kødædende pelsdyr, 39 kg pr. ha for slagtesvin, 35 kg pr. ha for søer og smågrise, 30 kg pr. ha for kvæg og andre typer organiske gødninger (Retsinformation.dk, 2019b). For slagtesvin sænkes fosforloftet til 35 kg fra planperioden 2020-21. (Retsinformation.dk, 2019b). I fosforfølsomme områder er der desuden tale om et skærpet fosforloft med en generelt grænseværdi på 30 kg fosfor pr. ha (Retsinformation.dk, 2019b).

Fosforloftet for udbringning af fosfor pr. ha har betydelige konsekvenser i områder med relativt stor husdyrproduktion, især hvis der er tale om husdyrgødning med højt fosforindhold. Der er som udgangspunkt tilstrækkeligt fosfor i Danmark til at dække behovet til afgrødedyrkning, men fosforressourcerne er ujævnt fordelt over landet med generelt overskud i Jylland pga. stor husdyrproduktion og generelt underskud øst for Storebælt, hvor bedrifterne domineres af plan-teavl (Poulsen et al., 2019). I områder med en stor mængde af fosfor i husdyrgødning kan det være ønskeligt at 'eksportere' fosfor til områder med lavere fosformængde. Særligt udfordrende kan det forholde sig i områder med biogasanlæg, der udover at afgasse husdyrgødning typisk også får tilført fosforholdige biomasser såsom organisk affald, og disse områder bliver således yderligere belastet med fosfor (Birkmose et al., 2019). På grund af et lavt tørstofindhold i gylle (tabel 2) vil det typisk være omkostningstungt at eksportere fosfor i form af gylle uden nogen form for opkoncentrering. Forskellige former for fraseparering af den faste fraktion (fiberfraktionen) fra gylle kan udgøre en måde at opkoncentrere tørstoffet og dermed fosforen i husdyrgødning (Poulsen et al., 2019) (se også senere afsnit om forbehandlingsmetoder). Udover denne form for separering kan forbrænding eller forgasning af fiberfraktionen fra gylle eller fast husdyrgødning yderligere opkoncentrere fosfor i askefraktionen (Kuligowski et al., 2010). Når fosforen opkoncentreres i asken, vil transportomkostningerne til eksport af fosfor være betydeligt lavere pr. kg fosfor (Poulsen et al., 2019), og dette kan udgøre et væsentligt incitament for forbrænding af husdyrgødning og fraktioner af husdyrgødning. Et andet

motiv for forbrænding af fiberfraktionen fra gylle kan være, at dette kan bruges som alternativ til efterafgrøder.

Udover effekten på fosfor balancen vil forbrænding af husdyrgødning kunne have en række andre konsekvenser af betydning for både landbrug og miljø, herunder øget import af kvælstofgødning, reduceret ammoniakfordampning, reduceret N-udvaskning, reduceret kulstoflagring i jorden, reduceret emission af drivhusgasser (metan og lattergas) og øget emission af NO_x (Schou et al., 2006).

Indholdet af næringsstoffer varierer særdeles meget mellem forskellige typer af husdyrgødning, og tabel 3 viser normtal for koncentrationer af kvælstof, fosfor og kalium i forskellige typer husdyrgødning. Koncentrationen af næringsstoffer er generelt betydeligt højere i husdyrgødning fra høns og slagtekyllinger sammenlignet med andre husdyrarter. Således kan indholdet af fosfor variere mellem 7 og 19 kg pr. ton dybstrøelse fra høns og slagtekyllinger, mens det varierer mellem 1,1 og 4,8 kg pr. ton for øvrige husdyrarter. Ud fra et næringsstofsynspunkt vil det derfor kunne give en betydeligt større 'fosforeksport' ved forbrænding af dybstrøelse fra fjerkræ sammenlignet med andre typer dybstrøelse.

TABEL 3. Indhold af kvælstof, fosfor og kalium pr. ton friskvægt i typer af husdyrgødning i Danmark. Normtal repræsenterer konventionel husdyrproduktion, mens økologisk produktion ikke er repræsenteret. (Fra (Lund et al., 2019).

Husdyrart	N (kg pr. ton)			P (kg pr. ton)			K (kg pr. ton)		
	Gylle	Dybstrøelse	Fast staldgødning	Gylle	Dybstrøelse	Fast staldgødning	Gylle	Dybstrøelse	Fast staldgødning
Køer	4,1-4,9	8,1-10,1	6,3	0,65-0,72	1,23-1,55	1,73-1,90	2,5-3,4	7,8-9,8	2,4-2,5
Kvier og stude	6,1-7,2	7,9-9,5	4,7	0,90-1,03	1,12-1,36	1,35	6,7-7,7	10,9-12,5	3,7
Søer	3,7-4,4	6,8-7,5	8,3	0,83-1,01	1,86-2,09	4,21	1,7-2,1	8,5-8,8	6,0
Slagtesvin	4,6-4,9	11,4	9,3	1,08-1,09	3,66	4,58	2,6-2,6	13,1	7,0
Smågrise	3,1-3,3	11,2	8,9	0,89	4,78	5,21	2,0	16,3	7,6
Høns	6,0-7,3	18,7-49,8	18,4-41,1	1,56-1,82	13,7-19,3	5,50-14,1	2,8-3,2	19,4-29,2	10,0-24,9
Slagtekyllinger	-	23,7-36,2	-	-	6,72-12,1	-	-	17,1-18,2	-
Mink	8,5-9,5	10,0	-	2,13-2,80	3,24	-	1,3-2,0	3,6	-
Heste	-	7,1-9,3	-	-	1,56-1,92	-	-	11,7-14,1	-

Delkonklusion

Mængdemæssigt udgør husdyrgødning fra kvæg og svin den største ressource til gødskning og forbrænding m.m., men hvis der tages hensyn til forbrændingsaspekter og næringsstofaspekter, så udgør fjerkrægødning umiddelbart en oplagt ressource til forbrænding af husdyrgødning i kraft af et højt tørstofindhold og et højt indhold af fosfor. De øvrige gødningstyper vil generelt kræve en form for forbehandling, før forbrænding vil være relevant. Hestegødning udgør mængdemæssigt også en vis størrelse, og med et relativt højt tørstofindhold og lavt næringsstofindhold kan denne ressource også være relevant i forhold til forbrænding, hvor det dog ikke så meget er næringsstofproblematikken, der vil være det primære incitament.

6.3 Relevante forbehandlingsmetoder

Dette afsnit beskriver årsager til behov for forbehandling af husdyrgødning før forbrænding samt gennemgår 4 hovedtyper af forbehandling: 1) separering i fiberfraktion og væskefraktion, 2) afgangning i biogasanlæg, 3) tørring samt 4) iblanding af støttebrændsel. Herunder viden om effekten af forbehandling på indholdet af tungmetaller m.m.

Årsager til behov for forbehandling før forbrænding

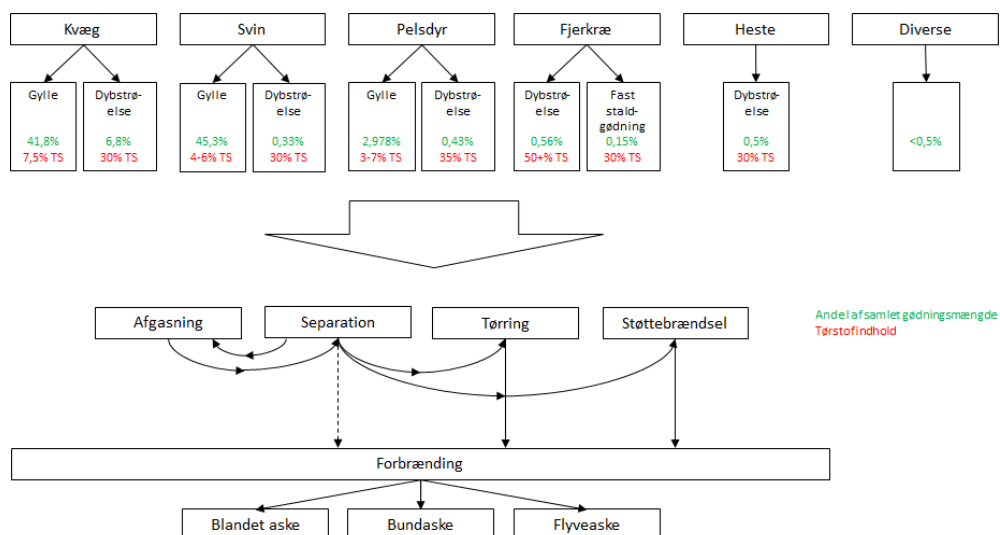
Forud for forbrænding kan det være relevant med forskellige former for forbehandling af husdyrgødningen, og et primært mål med forbehandlingen vil være at øge tørstofindholdet til et niveau, der sikrer en tilstrækkeligt god forbrænding. For at en biomasse kan brænde, skal den effektive brændværdi (nedre brændværdi) være større end energibehovet til at opvarme tørstoffet, forbrændingsluften samt opvarme og fordampe det indeholdte vand (Westborg et al., 2010). Desuden skal forbrændingstemperaturen op på mindst 850°C i 2 sekunder for at sikre en effektiv forbrænding, hvor brændbare bestanddele forbrændes til vand og CO₂ (Westborg et al., 2010). Hvis ikke kulstoffet forbrændes ordentligt, vil energiudnyttelsen være dårlig, og der vil desuden kunne opstå luftforurening med CO og sandsynligvis også PAH og andre uforbrændte kulbrinter (Westborg et al., 2010).

Der kan også være andre incitamenter til forbehandling af husdyrgødning såsom at øge koncentrationen af næringsstoffer såsom fosfor af hensyn til næringsstofbalancen på landbrugsbedrifter m.v. Da både tørstofindhold og næringsstofindhold kan variere markant både mellem dyrearter og mellem gødningstyper indenfor en dyreart, vil der være forskellige behov for forbehandling afhængig af gødningstype.

Der findes en række mulige forbehandlingsmetoder til husdyrgødning, og i dette afsnit vil der blive fokuseret på følgende fire hovedprincipper, der vurderes som værende mest relevante:

1. Separering i en fiberfraktion og en væskefraktion
2. Afgasning i biogasanlæg
3. Tørring
4. Iblanding af støttebrændsel

I figur 1 er der illustreret mulige kombinationer af husdyrgødningstyper og forbehandlingsmetoder forud for forbrænding. Figuren er ikke udtømmende, og der kan være mange kombinationsmuligheder med flere eller færre trin. For eksempel kan gylle separeres og fiberfraktionen anvendes direkte til forbrænding, gyllen kan afgasses i biogasanlæg, hvorefter fiberfraktionen frasepareres og anvendes til forbrænding, eller der kan være et separeringstrin både før og efter afgasning i biogasanlægget. Generelt vil gylle pga. det lave tørstofindhold være mest oplagt i kombination med separering og afgasning i biogasanlæg, mens det for de mere tørre gødningstyper såsom fjerkrægødning kan være mere oplagt med tørring eller evt. anvendelse til forbrænding helt uden forbehandling.



FIGUR 1. Illustration af forskellige kombinationer af gødningstyper og forbehandlingsmetoder forud for forbrænding af husdyrgødning. Tal under hver gødningstype angiver procentvis andel af den samlede årlige gødningsmængde i Danmark (pct. af foreliggende vare ab lager) fra tabel 1 (baseret på (Birkmose et al., 2019)) og det typiske tørstofindhold i gødningstyperne fra tabel 2.

I det følgende gennemgås principperne for hhv. separering, afgasning, tørring og iblanding af støttebrændsel, og metodernes generelle effekt i forhold til forbrænding skitseres.

Separering

Separering af gylle har til formål at opdele gyllen i en fiberfraktion med højt indhold af tørstof og en væskefraktion med lavt indhold af tørstof, og hvor man samtidig kan opnå forskelle i indholdet af forskellige næringsstoffer i de to fraktioner. Separering kan være relevant både på uafgasset gylle og afgasset gylle fra biogasanlæg, ligesom det kan være relevant at anvende fiberfraktionen fra gylle i biogasproduktionen. Gylleseparering udgør en mulighed for bedre udnyttelse af gyllens kvælstofindhold ved anvendelse af væskefraktionen og en mulighed for at føre den fosforrige fiberfraktion væk fra lokalområdet. I forhold til efterfølgende forbrænding er det vigtigt at fiberfraktionen opnår et tilstrækkeligt højt tørstofindhold, så der opnås en positiv nedre brændværdi, hvilket ikke altid er tilfældet med de anvendte separeringsteknologier (Skov & Jensen, 2015).

Der findes en række forskellige teknologier til separering af gylle, og teknologierne kan inddeles i kategorier som sedimentation, centrifugering (f.eks. dekantercentrifuge), dræning (f.eks. bæltepresse) og filtrering med tryk (f.eks. skruetpresse) (Hjorth et al., 2010). Separeringsteknologierne kan evt. kombineres med forskellige kemiske behandlinger forud for separeringen, der kan fremme separeringen i de to fraktioner, f.eks. ved tilsætning af multivalente kationer (såsom Fe^{3+}) som kan få partikler til at koagulere og fosfor til at udfælde, og tilsætning af polymerer der kan få partikler til at flokkulere (Hjorth et al., 2010).

Baseret på et omfattende review af separeringsteknologier (Hjorth et al., 2010) er der i tabel 4 angivet separeringseffektivitet for de forskellige hovedgrupper af separeringsteknologier. Separeringseffektiviteten angiver den procentvise vægtandel af de forskellige komponenter, der ender i fiberfraktionen. Tabellen viser gennemsnitsværdier og spredning for en række forsøg med svinegylle eller kvæggylle, og værdierne dækker dermed over et betydeligt spænd i forsøgsbetingelser. Ikke desto mindre viser tallene nogle generelle forskelle mht. effektivitet; dekantercentrifugering og separering efter koagulering og flokkulering giver generelt den største opkoncentrering af både tørstof og fosfor, dvs. der opnås en relativt stor andel af tørstoffet og

fosforen i en relativt lille fiberfraktion. Generelt sker der en begrænset opkoncentrering af totalkvælstof i fiberfraktionen og ingen opkoncentrering af ammoniumkvælstof og kalium (Aguirre-Villegas et al., 2019; Hjorth et al., 2010). Det er ofte den forskellige opkoncentrering af kvælstof og fosfor i de to fraktioner, der udgør incitamentet for separering af gyllen. Gylle forsures i nogle tilfælde i stalden for at reducere ammoniakfordampningen, og forsuring af svinegylle medfører en lavere opkoncentrering af tørstof og næringsstoffer i fiberfraktionen sammenlignet med uforsuret gylle (Cocolo et al., 2016).

Tabel 4. Effektivitet af forskellige separeringsteknologier til gylle. Separeringseffekt angiver, hvor stor en del af de forskellige komponenter, der ender i fiberfraktionen efter separeringen. Gennemsnit og spredning baseret på et antal studier. (Data fra (Hjorth et al., 2010)).

Separeringsteknologi	Antal observationer		Separeringseffekt (%)					
	Svinegylle	Kvæggylle		Volumen	Tørstof	Total-N	NH ₄ -N	Total-P
Sedimentation	2	4	Gnsn.	22	56	33	28	52
			Spredning	(4)	(10)	(2)	(2)	(21)
Dekantercentrifugering	11	5	Gnsn.	14	61	28	16	71
			Spredning	(7)	(16)	(10)	(8)	(14)
Dræning	8	6	Gnsn.	23	44	27	23	34
			Spredning	(16)	(27)	(17)	(19)	(21)
Filtrering m. tryk (skruepresning)	7	10	Gnsn.	11	37	15	-	17
			Spredning	(15)	(18)	(17)	-	(14)
Separering efter koagulering og flokkulering	21	7	Gnsn.	22	70	43	20	79
			Spredning	(16)	(13)	(24)	(14)	(21)

I forhold til efterfølgende forbrænding af fiberfraktionen er tørstofindholdet som nævnt af stor betydning. I tabel 5 er vist tørstofindhold og askeindhold i 47 danske prøver af fiberfraktionen fra forskellige separeringsteknologier (Jørgensen & Jensen, 2009). Ofte ligger tørstofindholdet omkring 30% i fiberfraktionen med betydelige udsving mellem prøver og separeringsteknologier, men der opnås kun sjældent over 35% tørstofindhold. I en amerikansk undersøgelse af separering af afgasset kvæggylle var tørstofindholdet også generelt mellem 25 og 35% i fiberfraktionen fra skruepresser og dekantercentrifuge (Aguirre-Villegas et al., 2019).

Tabel 5. Tørstofindhold og askeindhold i fiberfraktionen fra forskellige separeringsteknologier til gylle og afgasset gylle. Gennemsnit samt minimum og maksimum baseret på et antal studier. (Data fra (Jørgensen & Jensen, 2009)).

Separeringsteknologi	Gylletype	Antal observationer		Tørstof (%)	Aske (% af TS)
Dekantercentrifuge	Afgasset	7	Gnsn.	28,2	26,8
			Min.-maks.	24,9-33,7	14,5-35,9
Kemi + bæltepresse	Svin, mink	19	Gnsn.	24,5	18,3
			Min.-maks.	17,2-34,9	8,0-37,4
Roterende filter + skruepresse	Svin, kvæg	10	Gnsn.	39,2	9,5
			Min.-maks.	18,3-53,0	5,7-12,1
Skruepresse + roterende filter	Svin	5	Gnsn.	29,9	9,1
			Min.-maks.	26,1-37,2	7,2-12,1
Skruepresse	Svin	3	Gnsn.	28,2	9,2
			Min.-maks.	29,7-30,3	6,0-12,1

I en dansk undersøgelse af 35 prøver af fiberfraktionen fra gylle fra svin, kvæg og mink samt afgasset gylle ved en række forskellige separeringsmetoder blev det fundet, at både den øvre og nedre brændværdi (dvs. med og uden udnyttelse af kondenseringsvarmen) for våd fiberfraktion generelt var højere for afgasset gylle og svinegylle end for kvæggylle og til dels for minkgylle, men brændværdien varierede meget mellem de enkelte prøver (Thygesen & Johnsen, 2012). Efter tørring af fiberfraktionen til 10% vand var den nedre brændværdi højest for fiber fra kvæggylle (17,8 MJ/kg), formodentlig pga. stort halmindhold, og lavest for fiber fra minkgylle (11,0 MJ/kg) pga. højt askeindhold. Der var ingen sikker forskel i brændværdi mellem afgasset fiber (15,5 MJ/kg) og fiber fra svinegylle (16,3 MJ/kg) til trods for et højere askeindhold i afgasset fiber, formodentlig pga. et højere indhold af lignin mm. i den afgassede fiber (Thygesen & Johnsen, 2012).

Et dansk forsøg med forskellige separeringsmetoder og forskellige typer gylle viste, at separeringen også havde indflydelse på fordelingen af tungmetallerne cadmium, kobber og zink mellem fiberfraktionen og væskefraktionen (Møller et al., 2007). Kemisk fældning medførte 92, 95 og 99,5% af hhv. cadmium, kobber og zink i fiberfraktionen, dekantercentrifugering medførte 27, 31 og 38% af de tre tungmetaller i fiberfraktionen, og skruepresning medførte 8,9, 6,4 og 7,0% af de tre tungmetaller i fiberfraktionen. Generelt medførte separeringsmetoderne dekantercentrifugering og især skruepresning således, at koncentrationen af tungmetaller blev øget i væskefraktionen og sænket i fiberfraktionen sammenlignet med koncentrationen før separeringen (Møller et al., 2007). Kemisk fældning gav derimod højere koncentration af tungmetaller i fiberfraktionen end i væskefraktionen. For cadmium var koncentrationen typisk 2-4 gange højere i væskefraktionen end i fiberfraktionen efter skruepresning og dekantercentrifugering. Af de tre tungmetaller blev zink i størst omfang overført til fiberfraktionen og cadmium i mindst omfang. Generelt blev en stigende andel af tungmetallerne overført til fiberfraktionen med stigende tørstofindhold i gyllen før separeringen. Fordelingen af fosfor mellem fiberfraktion og væskefraktion fulgte stort set fordelingen af tungmetaller ved skruepresning, mens dekantercentrifugering medførte en lavere opkoncentrering af tungmetaller end fosfor i fiberfraktionen. Generelt sker der således ikke nogen større opkoncentrering af tungmetaller end af fosfor i fiberfraktionen ved skruepresning og dekantercentrifugering.

I et dansk forsøg med separering af svinegylle med og uden forsuring blev der bl.a. målt indhold af tørstof, fosfor, kobber og zink i væskefraktion og fiberfraktion (Sommer et al., 2015). Der blev separeret både vha. skruepresning, flokkulering+dræning og dekantercentrifugering. I

forhold til forbrænding af fiberfraktionen er det mest relevant at vurdere indholdet af kobber og zink på tørstofbasis og evt. på basis af fosforindholdet, og i tabel 6 er beregnet disse koncentrationer samt forholdsmæssig koncentration af kobber og zink i væskefraktionen i forhold til fiberfraktionen. For skruepresning og dekantercentrifugering er koncentrationen (på tørstofbasis) af både kobber og zink 3,9-5,9 gange højere i væskefraktionen end i fiberfraktionen uden forsuring og 1,9-3,8 gange højere med forsuring. På tørstofbasis sker der således en reduktion af indholdet af kobber og zink i fiberfraktionen efter separering, omend reduktionen er lidt mindre for forsuret gylle. For flokkulering+dræning sker der derimod en opkoncentrering af både kobber og zink i fiberfraktionen. Hvis indholdet af kobber og zink beregnes på basis af fosforindholdet, sker der også en opkoncentrering i væskefraktionen efter dekantercentrifugering uden forsuring, men ikke nogen væsentlig ændring efter skruepresning. Resultaterne fra både (Sommer et al., 2015) og (Møller et al., 2007) indikerer, at der ikke er nogen risiko for opkoncentrering af kobber og zink i fiberfraktionen fra svinegylle ved separering med dekantercentrifuge og skruepresse, men det er der til gengæld ved flokkulering+dræning.

Tabel 6. Indhold af tørstof, fosfor, kobber og zink i fraktioner af svinegylle med og uden forsuring. I kilden er koncentrationen angivet på råvarebasis, og her er desuden beregnet på basis af indhold af tørstof og fosfor. Desuden er beregnet den forholdsmæssige koncentration af kobber og zink i væskefraktionen i forhold til fiberfraktionen. (Baseret på data fra (Sommer et al., 2015). Værdier er baseret på 2 gentagelser.

Separeringsteknologi	For- su- ring	Fraktion	Koncentration								Koncentration i væ- ske i fht. i fiber			
			Tør- stof	P	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn
			(g/kg rå- vare)	(mg/kg rå- vare)	(mg/kg TS)		(mg/kg P)		(mg/kg P)		(For- holdstal, tørstof- basis)	(For- holdstal, fosforbæ- sis)		
Ubehandlet	-	Gylle	83	1,6	12,8	62,3	154,2	751	8.000	38.938				
	-	Gylle	95	1,9	13,3	79,3	140,0	835	7.000	41.737				
	+	Gylle, stald	90	1,4	12,5	65,5	138,9	728	8.929	46.786				
	+	Gylle, tank	84	1,4	10,8	55,8	128,6	664	7.714	39.857				
Skruepresning	-	Væske	66	2	14	83,5	212,1	1265	7.000	41.750	4,6	4,8	1,3	1,4
	-	Fiber	271	2,4	12,5	71,5	46,1	264	5.208	29.792				
	+	Væske	67	1,4	10	56,5	149,3	843	7.143	40.357	3,5	3,8	1,0	1,1
	+	Fiber	247	1,5	10,4	54,5	42,1	221	6.933	36.333				
Flokkulering+dræning	-	Væske	9	0,2	<0,01	1,9	-	211	-	9.500	-	0,2	-	0,2
	-	Fiber	127	2,5	18,5	110	145,7	866	7.400	44.000				
	+	Væske	21	0,6	<0,01	1,1	-	52	-	1.833	-	0,1	-	0,0
	+	Fiber	123	1,4	18,5	105	150,4	854	13.214	75.000				
Dekantercentrifugering	-	Væske	43	0,5	13	68,5	302,3	1593	26.000	137.000	5,9	3,9	11,2	7,4
	-	Fiber	332	7,3	17	135	51,2	407	2.329	18.493				
	+	Væske	54	1,2	9,3	45	172,2	833	7.750	37.500	2,9	1,9	1,0	0,6
	+	Fiber	327	2,5	19,5	145	59,6	443	7.800	58.000				

Et italiensk studie undersøgte koncentrationen af tungmetaller i væskefraktionen og fiberfraktionen af afgasset gylle fra 13 biogasanlæg (enten baseret på svinegylle eller kvæggylle men som regel suppleret med energiafgrøder) ved separering med skruepresse (Tambone et al., 2017). Som gennemsnit var der meget lille og ikke-signifikant forskel i koncentrationen mellem de to fraktioner, men den gennemsnitlige separeringseffektivitet var da også meget lav med kun 32% af tørstoffet i fiberfraktionen.

Der er indikationer på, at anvendelse af visse polymerer som flokkuleringsmiddel ved separering af kvæggylle kan sænke indholdet af patogene bakterier i væskefraktionen (Liu et al., 2016). Dekantercentrifugering af gylle kan i nogen udstrækning reducere forekomsten af bakterier i væskefraktionen, men kun ved meget høje omdrejninger ('g-force'), som er højere end hvad der normalt anvendes til separering af gylle (Liu et al., 2017). En tidligere dansk vurdering viser dog, at mikroorganismer inkl. sygdomsfremkaldende mikroorganismer fra gyllen vil fordele sig både i væskefraktionen og fiberfraktionen, og begge fraktioner skal der opfattes som potentielt forurenede med sygdomsfremkaldende mikroorganismer (Baggesen, 2005).

Afgasning i biogasanlæg

Afgasning af husdyrgødning i biogasanlæg har en betydelig positiv klimaeffekt, da det dels reducerer emissionen af metan fra husdyrgødning til atmosfæren og dels bidrager med fornybar energi i form af metan. Husdyrgødningsbaserede biogasanlæg giver også mulighed for at indtage andre restbiomasser til energiproduktion og efterfølgende recirkulering af næringsstoffer. Udover omsætning af noget af det organiske materiale i biomassen til metan kan afgasningen også have andre effekter. Indholdet af ammonium-kvælstof er ofte væsentligt højere i afgasset gylle end i uafgasset svinegylle og kvæggylle (Risberg et al., 2017), og dette er en vigtig positiv effekt i forhold til at forbedre gødningsvirkningen af gyllen. Afgasning af husdyrgødning i biogasanlæg kan også reducere koncentrationen af antibiotika-rester men kan ikke sikre en fuldstændig nedbrydning (Widyasari-Mehta et al., 2016).

Ved afgasning i biogasanlæg omsættes en del af det organiske stof mikrobielt til en blanding af gasser som metan og kuldioxid. Ved afgasning omsættes typisk 60-80% af det organiske stof i husdyrgødningen (Awasthi et al., 2019). Efter afgasning og separering af den afgassede biomasse er der derfor ofte stadig et betydeligt energipotentiale i fiberfraktionen (Thygesen et al., 2014), og for afgasning af svinegylle er i størrelsesordenen 35% af det organiske stof tilbage i den afgassede biomasse (Awasthi et al., 2019). Dette restpotentiale vil bidrage til brændværdien, hvis fiberfraktionen efterfølgende forbrændes. De kemiske og fysiske egenskaber af afgasset biomasse afhænger af, hvilken biomassesammensætning der er tilført biogasanlægget (Kratzeisen et al., 2010).

I en dansk undersøgelse var der som tidligere nævnt ingen sikker forskel i nedre brændværdi efter tørring mellem afgasset gyllefiber og fiber fra svinegylle trods et højere askeindhold i afgasset gyllefiber, hvilket formodes at skyldes et højere indhold af lignin efter afgasning (Thygesen & Johnsen, 2012). Den afgassede gylle var dog baseret på forskellige blandinger af gylle fra forskellige dyrearter.

I en tysk undersøgelse blev der lavet forbrændingsforsøg med to typer afgasset biomasse, som blev separeret med dekantercentrifuge, tørret til 9-10% vandindhold og pelleteret før forbrænding (Kratzeisen et al., 2010). Den afgassede biomasse var dog fra biogasanlæg, som enten brugte rent plantemateriale (majs, græs, kartofler) eller plantemateriale og 7% fjerkrægødning. Derfor vurderes resultaterne ikke at være repræsentative for biogasanlæg med en større andel af husdyrgødning mht. f.eks. indhold af tungmetaller i asken.

En kinesisk undersøgelse med afgangning af kyllingemøg og majsstængler viste, at indholdet af tungmetaller på tørstofbasis blev øget med 11-37% efter afgangning i forhold til før afgangning (Yan et al., 2018). Opkoncentreringen varierede afhængig af procesparametre ved biogasprocessen, men alle typer af afgasset gylle blev klassificeret som værende med lav økologisk risiko. Der er ingen angivelse af koncentrationen af plantenæringsstoffer i den afgassede gylle, men det formodes, at koncentration af f.eks. fosfor og kalium vil øges tilsvarende.

Samlet set øger separering af husdyrgødning i en fiberfraktion og en væskefraktion generelt tørstofindholdet i fiberfraktionen, men generelt vil der være behov for at øge tørstofindholdet yderligere før forbrænding. Der er generelt relativt få data vedr. forbrænding af fiberfraktionen.

Tørring

En mulighed for at forbedre forbrændingsegenskaber af husdyrgødning kan være at tørre biomassen, så tørstofindholdet øges, og den effektive brændværdi derved bliver tilstrækkelig til at sikre en god forbrænding. Typisk skal der være over 50% tørstof i biomassen for at sikre et netto-energiudbytte og økonomisk bæredygtighed (Jensen, 2013). Tørring af husdyrgødning er ofte efterfulgt af enten brikettering eller pelletering bl.a. for at lette efterfølgende transport af biomassen (Jensen, 2013).

Der findes forskellige tørringssystemer, og til tørring af fiberfraktionen fra biogasanlæg kan f.eks. anvendes bæltetørring ('belt drying'), tromletørring ('drum drying'), 'feed-and-turn drying' eller 'solar flat-bed drying' (Awiszus et al., 2018) eller 'air impingement drying' (Boy et al., 2019). Selvom tørringsteknologierne er kommercielt tilgængelige, er der fortsat kun få biogasanlæg, der tørrer afgasset biomasse (Awiszus et al., 2018). Den samlede miljøeffekt af håndtering af afgasset biomasse afhænger bl.a. af energiforbruget, den anvendte energikilde (f.eks. biogas kontra naturgas) og evt. genvinding af varme m.m., og samlet set har konventionel tørring med f.eks. bæltetørring den største miljøbelastning og ressourceforbrug, mens soltørring og kompostering har den bedste profil med hensyn til energiforbrug og klimaeffekt ('global warming potential') (Rehl & Müller, 2011).

Udover at tørring fjerner vand fra gødningen, fører tørring også til tab af organisk tørstof og ammonium-N (Aguirre-Villegas et al., 2019). Ved tørring af husdyrgødning er det derfor nødvendigt at rense tørreluft/dampen for at forhindre emission af NH_3 og flygtige organiske forbindelser ('volatile organic compounds', VOC) (Jensen, 2013). I en dansk undersøgelse af tørring af fiberfraktionen (fra dekantercentrifuge) af afgasset biomasse fra biogasanlæg er det endvidere fundet, at forsuring af fiberfraktionen før tørringen med svovlsyre fra pH 9,2 til 6,5 og især 5,5 reducerede NH_3 -fordampningen væsentligt (Pantelopoulou et al., 2016).

I en dansk undersøgelse er det beregnet, at tørrede gyllepiller pga. det lave vandindhold (11,3%) kunne brænde uden støttebrændsel og også opnå en fuldstændig forbrænding (Westborg et al., 2010). I en anden dansk undersøgelse blev der fundet en brændværdi i gylle-fiber efter tørring til 10% vand på niveau med brændværdien i halm, men energiforbruget til tørring reducerer naturligvis nettoenergiudbyttet (Thygesen & Johnsen, 2012).

Iblanding af støttebrændsel til samforbrænding

Iblanding af støttebrændsel med højere tørstofindhold kan udgøre et alternativ til tørring af husdyrgødning for derved at opnå et højere tørstofindhold og en bedre forbrændingskvalitet.

I en dansk undersøgelse af 8 forskellige husdyrgødningers brændelseskvalitet blev der målt vandindhold og brændværdi m.m., og det blev vurderet, om gødningerne med det givne vandindhold og den givne brændværdi kunne brænde uden støttebrændsel (Westborg et al., 2010). Slagtekyllingegødning, hønsegødning fra rugehøns, hestegødning samt en enkelt type svinegyllefiber kunne brænde uden støttebrændsel, mens to andre typer gyllefiber/afgasset fiber var tæt på at kunne brænde, og kvæggyllefiber ikke kunne brænde uden støttebrændsel (tabel 7). Det var dog kun gyllepiller, kyllingegødning og hønsegødning, der teoretisk set kunne opnå fuldstændig forbrænding uden støttebrændsel, dvs. hvor flammentemperaturen kunne komme over 800-850°C og dermed minimere risiko for luftforurening med CO og PAH (Westborg et al., 2010).

Tabel 7. Effektiv brændværdi, vandindhold, energibehov til opvarmning og fordampning samt mulighed for at brænde uden støttebrændsel for 8 typer af husdyrgødning. (Fra (Westborg et al., 2010).

Gødningstype	Effektiv brændværdi (MJ/kg indleveret prøve)	Vandindhold (% i indleveret prøve)	Energibehov til opvarmning og fordampning (MJ)	Kan brænde uden støttebrændsel? Ja/nej
1. Hestegødning	3,46	70,30	1,82	Ja
2. Kvæggyllefiber, fra Kemira	1,86	78,50	2,03	Nej
3. Svinegyllefiber, fra Samson-anlæg	3,75	68,10	1,77	Ja
4. Svinegyllefiber, fra Kemira-anlæg	2,49	73,50	1,90	Ja, tæt på grænsen
5. Blandet gyllefiber efter afgasning	2,00	73,90	1,91	Ja, tæt på grænsen
6. Rugeægshønsegødning	6,92	23,70	0,65	Ja
7. Slagtekyllingegødning	9,99	35,70	0,95	Ja
8. Gyllepiller	14,87	11,30	0,34	Ja

Aarhus Universitet har gennemført test af forbrænding af tre typer gyllefiber i blanding med hvedehalm i et 200 kW stokerfyr (Kristensen et al., 2009). Gyllefiberen var opnået ved dekantercentrifugering af enten slagtesvinegylle eller afgasset gylle eller ved kemisk fældning af slagtesvinegylle, og tørstofindholdet varierede mellem 23 og 35%. Der blev iblandet mellem 27 og 55% gyllefiber (vægtprocent på basis af fugtigt brændsel), og der blev opnået en virkningsgrad på mellem 76,5 og 80,1%. Fiberfraktionen bidrog dog kun med 4-18% af kedeffecten. For visse fibertyper lod stor indfyring til at forhindre en optimal forbrænding. Det blev konkluderet, at det med en enkel teknologi er muligt at forbrænde gyllefiber sammen med halm i et mindre stokerfyringsanlæg til halm. Fiberens høje vandindhold gør dog, at fiberen maks. kan udgøre 50% af den indfyrede biomasse. I kedler med røggaskondensering vil der kunne opnås en større energiproduktion fra fibrene.

I en dansk undersøgelse blev der afprøvet forbrænding af gyllefiber sammen med skovflis i et flisfyrket kedelanlæg med trapperist (6MW), og hvor der blev tilsat op til 50% gyllefiber (Skov & Jensen, 2015). Det blev konkluderet, at gyllefiber og flis er et glimrende brændsel, der egner sig godt til forbrænding i et traditionelt flisfyr. Udfordringerne drejede sig især om varierende brændelseskvalitet, og der er behov for en homogen blanding af brændslerne.

I den ene prøveforbrænding blev der iblandet fra 10 til 25% sogyllefiber med 28% tørstofindhold, som blev blandet med træflis med 60% tørstofindhold, og i den anden prøveforbrænding blev der iblandet mellem 10 og 50% gyllefiber af forsuret svinegylle med 36% tørstofindhold. I begge tilfælde forløb forbrændingen godt. Ved iblanding af fiberfraktion fra forsuret svinegylle (forsuret med svovlsyre) blev røgkondensatvandet dog mere surt, og det var en udfordring at tilsætte tilstrækkeligt natriumhydroxid til at neutralisere røgkondensatvandet. Emissionen af CO var under værkets grænseværdi, mens emissionen af NO_x var omkring eller lidt over grænseværdien (se senere afsnit om emissioner). Endvidere nævnes det, at der var visse mindre lugtgener ved håndtering af gyllefiber, som vurderes at kunne løses ved automatiseret håndtering på indendørs lager (Skov & Jensen, 2015).

I en dansk undersøgelse blev der afprøvet forbrænding af afgasset gyllefiber i et kraftvarmeværk (12 MW), hvor der blev fyret med enten ren halm eller halm blandet med gyllefiber i forholdet 80:20%, dvs. med en stor andel halm som støttebrændsel (Møller et al., 2007). Gyllefiberen blev forud for forbrændingen tørret til 85% tørstof, og der var ingen tekniske problemer ved forbrændingen og heller ikke ved håndteringen.

I en polsk undersøgelse blev der forbrændt gødning fra æglæggende høner med forskellige andele af kul som støttebrændsel (0, 25, 50, 75 og 100% kul), men der er ingen oplysninger om indholdsstoffer i asken (Junga et al., 2017).

I en italiensk undersøgelse blev der lavet forbrændingsforsøg med tørret (300°C) og pelletteret afgasset biomasse fra et biogasanlæg, der brugte husdyrgødning, majs og halm (Pedrazzi et al., 2015). Disse gødningspiller gav en dårlig forbrænding ved anvendelse i renbestand pga. lavt askesmeltepunkt og sintring (sammenhæftning af askepartikler). Der blev opnået en bedre forbrænding ved tørring ved en lavere temperatur på 150°C, men forbrændingen blev først god ved anvendelse af piller bestående af 50% tørret afgasset biomasse og 50% træ.

Samlet set kan der være betydelige fordele ved anvendelse af støttebrændsel såsom halm eller træflis ved forbrænding af husdyrgødning. Iblanding af mere tør brændsel vil øge tørstofindholdet og dermed den effektive brændværdi samt være med til at sikre en højere forbrændingstemperatur og dermed minimere risikoen for emission af uønskede stoffer. Udfordringerne ved anvendelse af støttebrændsel kan bl.a. være mere besvær og ekstra omkostninger ved at håndtere to biomasser fremfor én, ligesom der er behov for et system til at sikre en god opblanding af de to typer biomasse. Iblanding af støttebrændsel skal dog også ses som et alternativ til tørring af husdyrgødning for at opnå tilstrækkeligt højt tørstofindhold, og omkostningerne skal derfor vurderes i forhold til de alternative omkostninger ved tørring af husdyrgødning.

Delkonklusion

Et væsentligt formål med forbehandling af husdyrgødning forud for forbrænding vil være at øge tørstofindholdet, men der kan også være andre formål såsom at modificere næringsstofsammensætningen. Separering af husdyrgødning (primært gylle og afgasset gylle) i en fiberfraktion og en væskefraktion kan gøres med forskellige teknologier, men generelt vil der være behov for at øge tørstofindholdet yderligere før forbrænding. Ved afgasning af husdyrgødning i biogasanlæg omdannes en del af energiindholdet til metan, mens resten i princippet vil kunne forbrændes på samme måde som fiberfraktion fra uafgasset gylle, dog kan der være tale om en vis opkoncentrering af tungmetaller og næringsstoffer (på tørstofbasis). Tørring af husdyrgødning kan øge tørstofindholdet til det ønskede niveau og dermed forbedre forbrændingen, men reducerer derved nettoenergiudbyttet, og det kræver håndtering af ammonium-kvælstof i dampen. Iblanding af mere tørt støttebrændsel såsom halm eller træflis kan øge tørstofindholdet.

det og dermed forbedre forbrænding, men kræver håndtering af to typer biomasse og god opblanding. Ofte vil det være relevant med kombinationer af forskellige forbehandlingsteknologier, f.eks. afgangning og separering samt separering kombineret med enten tørring eller iblanding af støttebrændsel. Den optimale kombination af type af husdyrgødning og type af forbehandling vil formodentlig afhænge af de konkrete forhold.

6.4 Viden om næringsstoffer og tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning

I dette afsnit gennemgås den fundne viden om næringsstoffer og tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning. Afsnittet belyser indholdet af de vigtigste plantenæringsstoffer i aske, plantetilgængelighed af næringsstoffer i aske, smeltepunkt for aske samt indholdet af tungmetaller i aske.

Fokus i gennemgangen er på aske fra forbrænding af husdyrgødning, men det skal nævnes, at der i de seneste år også er arbejdet meget på udvikling af teknologier til forgasning/pyrolyse af husdyrgødning som alternativ til forbrænding, ofte med fokus på fjerkrægødning (se f.eks. (Jeswani et al., 2019; Katsaros et al., 2019; Shankar Pandey et al., 2019; Simbolon et al., 2019; Tańczuk et al., 2019; Zhou et al., 2018)). Biokoks/biochar fra forgasning/pyrolyse vil kunne adskille sig væsentligt fra aske fra forbrænding bl.a. pga. lavere procestemperatur og anderledes iltforhold, og det er derfor også relevant at belyse kvaliteten af biokoks/biochar til jordbrugsformål. Dette ligger udenfor formålet med denne rapport.

Det skal endvidere bemærkes, at sammensætningen af husdyrgødning kan variere både indenfor og imellem landbrugsbedrifter, ligesom den kan variere over tid pga. ændringer i f.eks. fodringspraksis og teknologi til håndtering af husdyrgødning (Aguirre-Villegas et al., 2019). Derfor vil analyser af husdyrgødning fra enkeltbedrifter ikke nødvendigvis være repræsentative for den generelle praksis, ligesom resultater fra ældre undersøgelser heller ikke nødvendigvis vil være dækkende for den nuværende landbrugspraksis.

Indhold af næringsstoffer i aske

Indholdet af kvælstof er generelt lavt i aske efter forbrænding, da langt hovedparten eller hele indholdet af kvælstof tabes ved forbrændingen (Kristensen et al., 2009; Petersen & Sørensen, 2006; Schou et al., 2006). Asken vil derfor være uden værdi som kvælstofgødning (Arbejdsgruppen, 2005). Svovl vil ligeledes fordampe ved forbrænding og forgasning (Jensen, 2013). Derimod bevares en væsentlig del af brændslets andre vigtige grundstoffer af betydning som gødningsmidler såsom fosfor og kalium (Petersen & Sørensen, 2006), og en del undersøgelser af aske har derfor fokus på de askedannende grundstoffer, som også fungerer som næringsstoffer for plantevækst.

I en dansk undersøgelse blev 8 typer af husdyrgødning analyseret for indholdet af askedannende grundstoffer (Westborg et al., 2010). Koncentrationen af grundstofferne i gødningen før forbrænding er vist i tabel 8, mens den teoretiske koncentration i asken efter forbrænding er beregnet i tabel 9. Der er markante forskelle i koncentrationen af næringsstofferne i aske mellem de forskellige gødningstyper, bl.a. med væsentligt højere fosforindhold i svinegyllefiber end i kvæggyllefiber (tabel 9).

Tabel 8. Tørstofindhold i 8 typer af husdyrgødning samt indhold af aske samt af de væsentligste askedannende grundstoffer, angivet som indholdet før forbrænding. (Data fra (Westborg et al., 2010)).

Gødningstype	Tørstof	Askedannende grundstoffer										
		Aske i alt	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	Si	Ti
	(% af gødningen)	(% i tørstof af husdyrgødningen)										
1. Hestegødning	29,7	7,3	0,031	0,60	0,028	1,3	0,15	0,39	0,34	0,13	1,30	0,003
2. Kvæggyllefiber, fra Kemira	21,5	9,5	0,079	1,0	0,076	1,4	0,35	0,38	0,32	0,35	1,20	0,006
3. Svinegyllefiber, fra Samson-anlæg	31,9	9,5	0,035	1,2	0,17	0,99	0,40	0,21	0,67	0,68	0,80	0,003
4. Svinegyllefiber, fra Kemira-anlæg	26,5	22,3	0,083	4,8	0,29	0,74	0,89	0,23	2,9	0,64	0,98	0,010
5. Blandet gyllefiber efter afgangning	26,1	22,7	0,11	4,4	0,17	1,0	1,4	0,24	2,5	0,58	0,18	0,009
6. Rugeægshønegødning	76,3	38,4	0,15	15	0,10	2,4	0,77	0,41	1,5	0,53	0,90	0,009
7. Slagtekyllingegødning	64,3	11,9	0,050	1,2	0,052	2,9	0,56	0,26	0,98	0,60	0,30	0,006
8. Gyllepiller	88,7	11,7	0,035	3,4	0,19	0,49	0,25	0,10	1,2	0,38	0,80	0,004

Tabel 9. Teoretisk indhold af de væsentligste askedannende grundstoffer i asken af 8 typer husdyrgødning. Beregnet ud fra koncentrationer i biomassen før forbrændingen samt en antagelse om, at den samlede mængde af hvert grundstof ender i aske. Desuden er der omregnet fra oxider til rene grundstoffer. (Beregnet ud fra data i (Westborg et al., 2010)).

Gødningstype	Aske	Askedannende grundstoffer (% i asketørstof)										
		(% af gødningen)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S ¹⁾	Si	Ti
1. Hestegødning	7,3		0,42	7,9	0,35	18	2,0	5,3	4,8	1,9	18	0,06
2. Kvæggyllefiber, fra Kemira	9,5		0,85	11	0,77	15	3,7	4,0	3,4	3,7	13	0,06
3. Svinegyllefiber, fra Samson-anlæg	9,5		0,37	13	1,8	11	4,2	2,2	7,0	7,2	8,4	0,06
4. Svinegyllefiber, fra Kemira-anlæg	22,3		0,37	21	1,3	3,3	4,0	1,0	13	2,9	4,4	0,06
5. Blandet gyllefiber efter afgangning	22,7		0,48	19	0,77	4,6	6,0	1,0	11	2,5	7,9	0,06
6. Rugeægshønegødning	38,4		0,37	39	0,28	6,1	2,0	1,0	4,0	1,4	2,3	0,02
7. Slagtekyllingegødning	11,9		0,42	11	0,42	25	4,7	2,2	8,3	5,0	2,6	0,06
8. Gyllepiller	11,7		0,32	29	1,6	4,2	2,1	0,89	10	3,3	7,0	0,03

¹⁾ Ved en foraskning ved 550°C (og derofter) vil et brændsels indhold af svovl helt eller delvist kunne afgives i form af svovldioxid. Indhold af svovl, som foreligger på sulfatform, vil forblive i asken ved udglødningen.

I et dansk forsøg med forbrænding af halm sammen med afgasset gyllefiber i et kraftvarmeværk med en forbrændingstemperatur på 950°C blev der fundet en fordeling mellem bundaske og flyveaske på ca. 80:20% (Møller et al., 2007). Indholdet af askedannende grundstoffer i biomassen før forbrænding er vist i tabel 10 for ren halm, ren fiberfraktion fra dekantercentrifugering samt en blanding af halm og gyllefiber (80:20%), og askeindholdet er endvidere vist for hhv. bundaske, flyveaske og samlet askemængde efter forbrænding. Koncentrationen af fosfor

var lidt højere i flyveaske end i bundaske, mens koncentrationen af kalium og svovl var væsentligt højere i flyveaske. Koncentrationen af calcium og magnesium var derimod højest i bundasken. Med den fundne fordeling mellem bundaske og flyveaske samt koncentrationerne i de to askefraktioner blev det fundet, at hovedparten af fosfor og calcium var i bundasken, mens kun ca. halvdelen af kalium var i bundasken. Hvis kun bundasken anvendes til gødskning, vil omtrent 80% af fosfor derfor recirkuleres, mens kun ca. halvdelen af kalium vil recirkuleres.

Tabel 10. Indhold af askedannende grundstoffer i fiberfraktion fra separering af afgasset gylle (dekantercentrifugering) og halm samt i aske efter forbrænding af disse biomasser. Asken er enten opdelt i bundaske og flyveaske eller angivet som samlet aske. (Fra (Møller et al., 2007)).

Biomassetype/asketype	Askedannende grundstoffer						
	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S
	(g/kg tørstof)						
Biomasse før forbrænding							
Fiberfraktion, afgasset svinegylle	59	0,21	7,5			46	
Halm år 2003	2,9	0,004	11	0,62	1,3	0,4	0,82
Halm år 2004	3,2	0,005	3,8	0,67	0,13	0,7	1,0
Bundaske							
Halm år 2003	36	0,035	29			12	
Halm år 2004	44	0,06	53	14	11	9,2	1,8
Halm : fiber afgasset svinegylle (80:20%)	61	0,10	44	23	13	24	2,8
Halm : fiber afgasset svinegylle (80:20%)	60	0,085	65			20	
Flyveaske							
Halm år 2003	22	0,21	276			25	
Halm år 2004	18	0,18	300	3,61	15	18	43
Halm : fiber afgasset svinegylle (80:20%)	13	0,14	300	2,42	17	25	44
Halm : fiber afgasset svinegylle (80:20%)	11	0,13	313			32	
Samlet aske							
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 1	240	11	30	45	15	82	23
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 2	220	19	33	70	7	150	16
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 3	200	12	29	54	13	104	14
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 4	130	6	26	43	9	88	10
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 5	210	27	54	52	15	120	20
Fiberfraktion kemisk separering slagtesvin	290	4	15	21	6	140	7

I en dansk undersøgelse af fosfor i aske fra forbrænding af forskellige typer af fiberfraktion fra husdyrgødning var indholdet total-fosfor 157, 123, 112 og 51 g pr. kg aske fra fiber fra hhv. mink, svin, afgasset gylle og kvæg, og trods betydelig variation mellem de enkelte prøver var indholdet af total-fosfor altid lavere i aske fra kvæggylle (Thygesen & Johnsen, 2012).

I en kinesisk undersøgelse af forbrænding af tre typer af husdyrgødning (fra slagtesvin, kød-kvæg, æglæggende høns) ved stigende temperaturer fra 400 til 900°C faldt askemængden og 'recovery' af kvælstof og kalium med stigende forbrændingstemperatur, mens recovery af fosfor ikke var særligt påvirket af temperaturen (Huang et al., 2011). På tværs af de tre gødnings-typer faldt recovery af total-kvælstof fra 7-19% ved 400°C til 0,1-15% ved 900°C, for kalium faldt recovery fra 78-95% til 56-61%, mens recovery for totalfosfor var 87-100% ved 400°C og

76-100% ved 900°C. Generelt var der højere recovery af kvælstof og lavere recovery af fosfor i aske fra kvæggødning end for aske fra svine- og hønsegødning, mens der var begrænset forskel mht. kalium (Huang et al., 2011). Der blev ikke målt på plantetilgængelighed af næringsstoffer og indhold af tungmetaller i asken.

I et japansk studie af forbrænding af husdyrgødning fra kvæg, svin, æglæggende høns samt slagtekyllinger ved 700°C var pH 7,0-8,7 i gødningen før forbrænding og 10,1-13,2 i askeprøverne efter forbrænding (Komiya et al., 2013). Indholdet af fosfor, kalium og andre næringsstoffer var generelt højest i aske fra svinegødning og slagtekyllingegødning og lavest i aske fra kvæggødning, bl.a. pga. større indhold af silicium i aske fra kvæggødning. Den elektriske ledningsevne var 3,5-6,8, 16,7-21,0 og 26,7-29,6 dS m⁻¹ for aske fra hhv. kvæggødning, svinegødning og fjerkrægødning.

Plantetilgængelighed af næringsstoffer i aske

Efter forbrænding findes fosfor i aske som en blanding af karbonat og hydroxyapatit, som har relativt lav vandopløselighed (Jensen, 2013). Kalcium, magnesium og flere mikronæringsstoffer er også relativt hårdt bundet i asken, og derfor er tilgængeligheden af disse næringsstoffer generelt lavere i asken end i gødningen før forbrænding (Jensen, 2013). Til gengæld er en betydelig del af kalium i asken vandopløselig og dermed umiddelbart tilgængelig for planter (Jensen, 2013). Tidligere har det været vurderet, at gødningsvirkningen af aske fra forbrænding af husdyrgødning i første år vil være under 50% af virkningen af handelsgødning for fosfor og over 50% af virkningen for kalium (Petersen et al., 2005). En nyere vurdering lyder dog, at plantetilgængeligheden af fosfor i aske fra forbrænding og forgasning af husdyrgødning generelt er på niveau med tilgængeligheden i husdyrgødningen før forbrændingen (Poulsen et al., 2019). Plantetilgængeligheden af fosfor og kalium i aske afhænger af forbrændingstemperaturen og opholdstid og er dermed afhængig af forbrændingssystemet (Petersen & Sørensen, 2006). Generelt forventes det dog, at en stor del af fosfor og kalium på lang sigt (>30 år) vil være tilgængeligt for planter, og derfor er tilgængeligheden acceptabel, hvor erstattingsgødsning er formålet (Petersen & Sørensen, 2006). På lang sigt forventes tilgængeligheden af fosfor i de fleste restprodukter at være på højde med handelsgødning (Rubæk, 2018).

I et dansk forsøg med forbrænding af fiberfraktionen fra separeret gylle blev det fundet, at plantetilgængeligheden af fosfor i asken blev halveret, når forbrændingstemperaturen blev øget fra 400 til 700°C, formentlig pga. dannelse af hydroxyapatit (Thygesen et al., 2011). Der kan derfor være et modsætningsforhold mellem hensynet til fosfortilgængelighed i asken og energiproduktionen, idet energiproduktionen er optimal ved temperaturer over 800°C. I forhold til fosfortilgængelighed kan termisk forgasning derfor være et interessant alternativ til forbrænding, da forgasning kan ske ved lavere temperaturer (Thygesen et al., 2011).

I en dansk undersøgelse af fosfor i aske fra forbrænding ved 850°C af forskellige typer af fiberfraktion fra husdyrgødning udgjorde vandopløseligt fosfor typisk under 1% af total-fosfor, og citratopløseligt fosfor udgjorde mellem 4 og 7% af total-fosfor (Thygesen & Johnsen, 2012). Der er ikke angivet opløselighed af fosforen før forbrænding, men den lave opløselighed i asken understreger behovet for at behandle asken for at opnå en effektiv fosforgødning, hvis der er behov for en hurtig virkning ved f.eks. startgødsning.

I et dansk forsøg med svinegyllefiber udgjorde vandopløseligt fosfor 19,7% af total-fosfor før forbrænding og kun 1,6% efter forbrænding ved 700-800°C (Skov & Jensen, 2015). Vandopløseligt kalium udgjorde 90,1% af total-kalium før forbrænding og 62,1% efter forbrænding.

Et dansk forsøg med forbrænding af halm og gyllefiber ved 950°C viste, at en stor del af fosforen i bundaske fra forbrænding blev bundet i en form for apatit og dermed havde lav vandopløselighed af fosfor på kun ca. 5-10% (Møller et al., 2007). Derimod var en stor del af fosforen i flyveaske lettere opløseligt med ca. 75-85% vandopløseligt fosfor. Til sammenligning var vandopløseligheden af fosfor ca. 15-25% for fiberfraktionen og ca. 60% for væskefraktionen af gylle og ca. 65% for afgasset gylle.

I et dansk studie af fosfortilgængelighed i aske fra forgasning og forbrænding af husdyrgødning var andelen af citratopløseligt fosfor (som procent af total-fosfor) 75% for tørret og pelleteret fiberfraktion af afgasset svinegylle+kvæggylle men kun 36% efter forbrænding (1.000°C) og 26% efter forgasning (730°C) (Kuligowski et al., 2010). Tilsvarende var andelen af citratopløseligt fosfor 95% for fiberfraktion (skruepresning) af svinegylle før forgasning men kun 11% i asken efter forgasning. Ud fra dyrkningsforsøg med vårbyg i første år og alm. rajgræs i andet år blev det konkluderet, at både fiberfraktionen af gødningerne og ubehandlet aske fra forgasning og forbrænding af fiberfraktionen ikke egner sig som startgødning, men at disse gødninger medvirkede til fosforforsyningen senere i vækstsæsonen (Kuligowski et al., 2010).

Et andet dansk studie af fiberfraktionen fra svinegylle viste, at vandopløseligheden af fosfor faldt markant med temperaturen ved forbrænding eller pyrolyse, med stort set intet vandopløseligt fosfor i aske ved forbrænding over 400°C og ved pyrolyse over 700°C (Christel et al., 2014). Efter indarbejdning af asken i jord blev tilgængeligheden af fosfor dog gradvist øget med tiden.

Den nedsatte opløselighed og lavere plantetilgængelighed af fosfor i aske bevirker, at aske fra forbrænding af husdyrgødning ikke er egnet som startgødning, men til gengæld kan asken anvendes som en 'slow-release' fosforgødning med langtidsvirkning (Jensen, 2013). Den lave plantetilgængelighed af fosfor kan bl.a. hænge sammen med det generelt høje pH-niveau i asken, og derfor kan plantetilgængeligheden ofte øges med tiden efter udbringning på jorden, især på jorde med relativt lav pH-værdi (Jensen, 2013). Hvis indholdet af tungmetaller er under grænseværdien, vil aske fra husdyrgødning kunne anvendes som fosforgødning uden anden behandling end pelletering (Sørensen & Rubæk, 2011).

En anden mulighed er at bearbejde asken, så fosfor kommer på en mere vandopløselig form, hvorved man samtidig kan reducere indholdet af tungmetaller, jern og aluminium (Ottosen, 2011). Relativt 'rene' asker med lavt indhold af tungmetal kan f.eks. oparbejdes med en billig vådkemisk proces, der fører til et indhold på 70% vandopløseligt fosfor. For 'urene' asker kræves en dyrere vådkemisk proces, som til gengæld kan føre til en gødning med 90% vandopløseligt fosfor, og hvor tungmetaller, jern og aluminium fjernes.

Smeltepunkt for aske

I en dansk undersøgelse af 8 forskellige husdyrgødningers brændselskvalitet blev der målt askesmeltepunkt, og askesmeltetemperaturerne er vist i tabel 11. Aske fra hønsegødning og kyllingegødningen havde et højt askesmeltepunkt, hvilket er positivt pga. mindre risiko for sint-ring, hvorimod asken fra hestegødning og kvæggyllefiber havde et lavere askesmeltepunkt på niveau med halm, hvilket kan gøre det til et mere problematisk brændsel (Westborg et al., 2010).

Tabel 11. Smelteforløb for aske fra 8 typer af husdyrgødning. (Fra (Westborg et al., 2010)).

Gødningstype	Karakteristisk temperatur (°C)		
	Blødgøring	Halvkugle	Flyde
1. Hestegødning	820	1.120	1.170
2. Kvæggyllefiber, fra Kemira	930	1.050	1.110
3. Svinegyllefiber, fra Samson-anlæg	1.130	1.180	1.210
4. Svinegyllefiber, fra Kemira-anlæg	1.210	1.280	1.380
5. Blandet gyllefiber efter afgangning	1.180	1.210	1.230
6. Rugeægshønegødning	>1.480	>1.480	>1.480
7. Slagtekyllingegødning	1.300	1.360	1.440
8. Gyllepilller	1.210	1.320	1.410

I en græsk undersøgelse af forbrænding af bl.a. tørret gødning fra svin ('swine manure') blev askesmeltepunktet undersøgt, og asken blev blød ved 1.050°C, halvkugleformet ved 1.195°C og flydende ved 1.280°C (Vamvuka et al., 2017). Askesmeltepunktet var derfor lavere end for aske fra olivenkerner og olivengrene, hvor asken blev blød ved 1.230 hhv. 1360°C og flydende ved 1.550 hhv. 1.530°C.

Tungmetaller i aske

Tungmetaller er en gruppe af metaller og metalloider, hvoraf de fleste er toksiske overfor mennesker og dyr, selv i lave koncentrationer (Vardhan et al., 2019). Der er derfor stor opmærksomhed på mulig forurening med tungmetaller og muligheder for at minimere eller afhjælpe forureningen. Tungmetallerne omfatter bl.a. kobber, zink, cadmium, krom, arsen, bor, kobolt, titanium, strontium, tin, vanadium, nikkel, molybdæn, kviksølv og bly (Vardhan et al., 2019). Tungmetallerne kobber, zink, nikkel, bor, jern og molybdæn er essentielle for plantevækst men kan være skadelige i højere koncentrationer. Andre tungmetaller som bly, kviksølv, cadmium og arsen er derimod ikke essentielle for planter og dyr.

Husdyrgødning indeholder tungmetaller i forskelligt omfang. I en undersøgelse af 45 gylleprøver fra kvæg og svin i 2002 blev der i alle prøver fundet et eller flere af tungmetallerne cadmium, kobber, nikkel, zink og aluminium (sidstnævnte er ikke et tungmetal i kemisk forstand) (Schwærter & Grant, 2003). Koncentrationen af kobber, nikkel og zink var generelt høj i svinegylle, og for kobber og zink sandsynligvis som følge af tilsætningsstoffer i foderet. Indholdet af tungmetaller i husdyrgødning vil være af betydning for forekomsten af tungmetaller i forbindelse med forbrænding af fast husdyrgødning og fiberfraktion fra gylle. Koncentrationen af tungmetaller i forskellige typer af husdyrgødning er opsummeret af (Schou et al., 2006) og gengivet i tabel 12, som delvis er baseret på danske analyser og delvis på data fra andre EU-lande. Det fremgår af tabel 12, at der især er variation i indholdet af kobber og zink mellem gødningstyperne med generelt højere indhold i gødning fra slagtesvin. Nyere danske undersøgelser af indholdet af kobber og zink i gylle fra smågrise viser meget varierende koncentrationer, som muligvis skyldes usikkerheder i forbindelse med prøvetagningen (Bak et al., 2019). Analyser af 11 prøver af gylle fra smågrise i 2015 viste et gennemsnitligt indhold af kobber og zink på hhv. 563 og 2.629 mg pr. kg tørstof (Bak et al., 2015), mens analyser af 6 prøver i

2019 viste et gennemsnitligt indhold på hhv. 1.922 og 7.916 mg pr. kg tørstof (Bak et al., 2019). Pga. usikkerheden om prøvetagning m.m. er det vanskeligt at konkludere, om tallene er udtryk for en generel ændring i koncentrationen af kobber og zink i svinegylle.

Tabel 12. Koncentration af tungmetaller i gødning i forskellige husdyrproduktioner, handelsgødning samt grænseværdier iflg. Affald til jord-bekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2018). Indholdet er angivet i ppm på tørstofbasis svarende til mg pr. kg tørstof. (Data fra Schou (Schou et al., 2006)).

Gødningstype/land	Antal prøver	Askedannende grundstoffer						
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
		(mg/kg tørstof)						
Slagtesvin, EU	180-1.143	0,3	9,4	193	12,0	3,0	934	-
Slagtesvin, DK	17	0,4	-	263	10,2	-	1.016	-
Malkekvæg, EU	431-721	0,4	6,9	42	6,2	5,6	207	-
Malkekvæg, DK	17	0,4	-	64	6,3	-	232	-
Slagtekyllinger + kalkun, EU	46-105	0,4	20,0	89	6,2	3,7	353	-
Fjerkræ, ungdyr, 3 arter, DK	28	-	-	149	-	-	572	-
Æglæggere, EU	22-66	0,4	6,5	62	7,0	3,2	471	-
Æglæggere, DK	71	-	-	116	-	-	663	-
N-kunstgødning (ren N-gødning)		0,9	3,4	2	6,0	1,9	5	-
Affald til jord-bekendtgørelsen		0,8	100,0	1.000	30,0	120	4.000	0,8

En undersøgelse af udviklingen af indholdet af kobber og zink i danske landbrugsjorder har vist en stigning på jorder, der er gødsket med svinegylle, specielt i perioden fra 1998 til 2014 (Jensen et al., 2016). Den nuværende brug af især zink kan udgøre en miljømæssig risiko for udvaskning til vandmiljøet, hvorfor anvendelsen af medicinsk zink udfases på EU-niveau i 2022 (SEGES, 2019).

Tungmetaller omdannes ikke og forsvinder ikke i større omfang ved forbrænding, og generelt antages det, at tungmetallerne findes i asken i samme mængde som i det materiale, der forbrændes (Schou et al., 2006). Dog er der en stor sandsynlighed for, at kviksølv fordampes ved forbrænding (Schou et al., 2006), og zink og i mindre udstrækning kobber vil også kunne forflygtiges ved højere forbrændingstemperaturer og udkondensere på flyveaskepartikler, og dermed vil der ske en opkoncentrering af disse tungmetaller i flyveasken (Westborg et al., 2010). Tidligere undersøgelser af tungmetaller i askefraktioner fra forbrænding af diverse biomasser har ligeledes vist, at især kviksølv, cadmium og bly opkoncentreres mange fold i flyveasken, mens der for krom, nikkel og zink kun sker en moderat eller slet ingen opkoncentrering (Nzihou & Stanmore, 2013). Der kan dog være stor forskel i fordelingen mellem bundaske og flyveaske, bl.a. afhængig af, hvor meget der blæses under forbrændingen, og dermed kan koncentrationen af indholdsstoffer i de to askefraktioner også forskydes (Skov, 2019).

Ved forbrænding af husdyrgødning sker der derfor generelt en opkoncentrering både af aske-dannende næringsstoffer som fosfor men også af tungmetaller som zink og kobber (Poulsen et al., 2019). Hvis det antages, at alt tungmetal i gødningen ender i asken, kan koncentrationen af tungmetal i asken beregnes ud fra koncentrationen af aske og tungmetal i husdyrgødningen før forbrændingen.

Schou et al. (Schou et al., 2006) antog i regneeksempler et askeindhold på 5% og dermed en opkoncentrering på 20 gange af tungmetaller i asken ved forbrænding af husdyrgødning.

Askeindholdet i f.eks. gyllefiber er dog ofte væsentligt højere på tørstofbasis og kan være mellem 10 og 40% afhængig af separeringsmetode (Møller et al., 2007), hvorfor opkoncentreringsen i aske i så fald snarere vil være mellem 2,5 og 10 gange. Schou et al. (Schou et al., 2006) vurderede, at en opkoncentrering af tungmetaller på 20 gange ved forbrænding vil kunne føre til overskridelse af den tørstofbaserede grænseværdi for cadmium i Affald til jord-bekendtgørelsen, men ikke af den fosforbaserede grænseværdi, hvis fosfor opkoncentreres med samme faktor. For zink, kobber og krom, hvor der kun findes tørstofrelaterede grænseværdier i Affald til jord-bekendtgørelsen, vurderedes det, at der måske kan forekomme overskridelser af grænseværdien ved forbrænding af husdyrgødning (Schou et al., 2006). Til sammenligning vurderede Petersen et al. (Petersen et al., 2005), at der kun synes at være problemer med kobber i forhold til grænseværdierne i Affald til jord-bekendtgørelsen, mens det antoges, at askeseparering på forbrændingsanlæggene vil betyde, at der ikke vil være problem med zink og cadmium ved udbringning af bundaske. På daværende tidspunkt var der dog generelt kun begrænset viden om forbrænding af husdyrgødning, og vurderingerne blev derfor i vid udstrækning baseret på viden om forbrænding af halm (f.eks. (Petersen et al., 2005).

I en dansk undersøgelse blev 8 typer af husdyrgødning analyseret bl.a. for indholdet af tungmetaller (Westborg et al., 2010). Ud fra en antagelse om, at alt tungmetal i husdyrgødningen efter forbrændingen vil ende i asken, er den teoretiske koncentration af tungmetaller i asken (i asketørstof) beregnet i tabel 13. Indholdet af zink og kobber var generelt meget højt i husdyrgødning sammenlignet med indholdet i halm (Westborg et al., 2010), med ca. 10-150 gange højere koncentrationer i tørstof før forbrænding og 4-52 gange højere koncentration (teoretisk) i asketørstof (tabel 13). Der var især høje koncentrationer af zink og kobber for gødningstyper baseret på svinegylle (tabel 13). Indholdet af nikkel og arsen var noget højere end for halm, med 2-10 gange højere koncentration i tørstof før forbrænding og 1-4 gange højere i asken (teoretisk) efter forbrænding (tabel 13).

Indholdet af cadmium i tørstof af husdyrgødningen var på niveau med indholdet i halm, dog var indholdet ca. 4 gange højere i svinegyllefiber fra anlæg med polymertil sætning (prøve 4) og hønsegødning (prøve 6) (Westborg et al., 2010), men det teoretiske indhold i asken er for alle gødningstyper lavere end i halm (tabel 13). Indholdet af krom, kviksølv og vanadin er generelt på samme niveau eller lavere end i halm (Westborg et al., 2010), og det teoretiske indhold i asken er i alle tilfælde lavere end i halm (tabel 13).

Tabel 13. Teoretisk indhold af tungmetaller i aske af 8 typer af husdyrgødning (mg/kg asketørstof) samt i aske af halm. Beregnet ud fra koncentrationer i biomassen før forbrændingen samt en antagelse om, at alt tungmetal ender i aske. (Beregnet ud fra data i (Westborg et al., 2010). Desuden grænseværdier for indhold i halmaske jf. Bioaskebekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2019a) og for indhold i affald jf. Affald til jordbekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2018).

Gødningstype	Aske (% i tør- stof)	Tungmetalindhold (mg/kg asketørstof)													
		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	V	Zn	
1. Hestegødning	7,3	4,93	1,07	5,89	42,5	397	0,23	1.151	15,1	21,9	5,21	0,45	11,2	1.507	
2. Kvæggyllefiber, fra Kemira	9,5	3,58	1,16	5,89	29,5	179	0,12	947	23,2	22,1	8,84	0,48	13,7	1.053	
3. Svinegyllefiber, fra Samson-anlæg	9,5	1,79	1,37	6,74	71,6	1.789	<0.06	2.421	100	78,9	10,3	0,57	32,6	10.316	
4. Svinegyllefiber, fra Kemira-anlæg	22,3	2,51	1,93	7,62	49,3	1.390	0,08	2.466	17,5	44,8	5,38	1,03	35,9	6.726	
5. Blandet gyllefiber efter afgangning	22,7	2,25	0,66	8,37	48,5	485	0,1	2.159	15,4	44,1	5,29	0,48	16,7	2.599	
6. Rugeægshønegødning	38,4	1,25	1,07	6,77	15,1	151	0,02	1.250	19,5	18,8	2,86	0,15	10,2	990	
7. Slagtekyllingegødning	11,9	1,51	1,34	16	26,9	731	<0,05	3.277	26,9	30,3	3,36	0,31	31,9	3.529	
8. Gyllepilller	11,7	2,14	0,59	4,96	70,1	359	0,05	1.880	10,3	46,2	8,29	0,94	21,4	3.248	
Halm jf. CEN/TS 14961, hvede, byg, rug	5,00	<2,0	2	-	200	40	0,4	-	-	20	10	-	60	200	
Grænseværdi for halmaske jf. Bioaskebek.			5,0		100		0,8			60	120				
Grænseværdi for affald jf. Affald til jordbek.			0,8		100	1.000	0,8			30	120			4.000	

I en dansk undersøgelse af aske fra forbrænding ved 850°C af 35 forskellige typer af fiberfraktion fra husdyrgødning blev der målt indhold af aluminium og tungmetaller, og resultaterne er vist i tabel 14 (Thygesen & Johnsen, 2012). I forhold til Affald til jord-bekendtgørelsens grænseværdier for tungmetaller overskred ingen af askeprøverne fra forbrænding af fiber fra kvæg og mink disse grænseværdier. Én af de 8 prøver af aske fra afgasset gylle overskred grænseværdierne (ikke angivet for hvilke tungmetaller), og denne prøve repræsenterede et biogasanlæg, der kun brugte svinegylle (Thygesen & Johnsen, 2012). Aske fra forbrænding af fiber fra svinegylle overskred i en række tilfælde grænseværdierne for tungmetaller, og der blev fundet kobber og zink i alle prøverne, mens krom og nikkel blev fundet i de fleste askeprøver. De høje koncentrationer af zink og kobber i asken fra svinegyllefiber formodes at skyldes anvendelsen af kobber og zink i foderet. Som gennemsnit af 11 typer foder blev anvendt 16,4 mg kobber og 107 mg zink pr. kg foder til slagtesvin og søer og 150 mg kobber og 119 mg zink pr. kg foder til smågrise, men der blev ikke fundet nogen sammenhæng mellem indholdet i foderet og indholdet i asken (Thygesen & Johnsen, 2012). Til gengæld var det høje indhold af kobber i asken fra svinegyllefiber relateret til separering med anvendelse af polymerer; 9 ud af 9 fiberprøver baseret på polymer-separering overskred grænseværdien for kobber og 7 ud af 9 prøver overskred grænseværdien for zink, hvorimod kun 2 ud af 12 fiberprøver uden polymer-anvendelse overskred grænseværdierne for kobber og zink (Thygesen & Johnsen, 2012). For alle prøver i undersøgelsen var indholdet af cadmium og bly under detektionsgrænsen på hhv. 0,8 og 120 mg pr. kg, formentlig pga. fordampning under forbrænding (Thygesen & Johnsen, 2012). Dette indikerer, at bundaske fra forbrænding i det normale temperaturniveau (850°C og derover) generelt ikke vil indeholde problematiske koncentrationer af cadmium og tungmetaller, hvis der ikke er anvendt polymerer til separering og dog afhængig af det specifikke forbrændingsanlæg (Thygesen & Johnsen, 2012).

Tabel 14. Indhold af aluminium og tungmetaller i aske af 4 typer af fiberfraktion af husdyrgødning. Gennemsnit samt spredning (i parentes) af prøver fra en række bedrifter. I kilden er indholdet af aluminium, zink, kobber og krom angivet på tørstofbasis, mens nikkel er angivet på fosforbasis. I tabellen er indholdet desuden omregnet til fosforbasis hhv. tørstofbasis ud fra det gennemsnitlige indhold af total-fosfor. Kolonner mærket med * er beregnede værdier. (Data fra (Thygesen & Johnsen, 2012)).

Biomassetype	An- tal prø- ver	Tørstof- Indhold		Indhold af total-fosfor		Indhold på tørstofbasis										Indhold på fosforbasis				
						Al		Zn		Cu		Cr		Ni*		Al*	Zn*	Cu*	Cr*	Ni
						(mg/kg)		(mg/kg)		(mg/kg)		(mg/kg)		(mg/kg)		(mg/kg P)				
		(%)		(g/kg)																
Afgasset fiber	8	28,3	(1,8)	112	(7,5)	16,8	(12,7)	2.633	(254)	786	(179)	27,5	(3,6)	40		150	23.509	7.018	246	360 (15,6)
Svinegyllefiber	21	28,1	(1,5)	123	(3,1)	2,8	(0,20)	4.293	(497)	1.269	(190)	29	(6,4)	64		23	34.902	10.317	236	520 (66,9)
Minkgyllefiber	3	34,5	(4,1)	157	(8,5)	0,27	(0,07)	624	(43,4)	44	(4,3)	-	-	12		2	3.975	280	-	74 -
Kvæggyllefiber	3	20,6	(0,41)	51	(10,0)	3,4	(0,46)	959	-	362	-	19	-	21		67	18.804	7.098	373	416 (42,1)
Grænseværdi jf. Af-fald til jord-bekendt-gørelsen		-		-		-		4.000		1.000		100		-						2.500

I et dansk forsøg med aske fra svinegyllefiber, der blev forbrændt ved 700-800°C, var indholdet af tungmetaller hhv. 6,5 mg/kg for cadmium, 23,4 mg/kg for bly og 1.760 mg/kg for zink (Skov & Jensen, 2015).

I en dansk undersøgelse blev der afprøvet forbrænding af halm sammen med afgasset gyllefiber i forholdet 80:20% (Møller et al., 2007). Gyllefiberen var fra et biogasanlæg, der anvendte ca. 95% svinegylle og ca. 5% organisk affald, og fiberfraktionen blev frasepareret med dekantercentrifuge. Forbrændingen af halm+fiberfraktion blev testet i et kraftvarmeværk (12 MW), og bundaske og flyveaske udgjorde hhv. 80 og 20% af den samlede askemængde, og dette forhold blev ikke ændret ved iblanding af gyllefiber i halmen. Flyveasken havde generelt væsentligt højere koncentration af tungmetaller som cadmium, zink og bly end bundasken. Koncentrationen af cadmium og zink var således omkring 100 gange højere i flyveasken end i bundasken (tabel 15). For kobber og nikkel var der dog ingen klar forskel i koncentrationen mellem de to askefraktioner. Den større opkoncentrering af cadmium i flyveasken sammenlignet med kobber skyldes det lavere kogepunkt for cadmium på 767°C mod 2.573°C for kobber (Birkmose & Zinck, 2008). I undersøgelsen blev det endvidere beregnet, at der tilføres en meget lille mængde cadmium til marken, hvis bundasken bruges som fosforgødning, og at cadmiummængden vil være mindre end ved gødskning med mineralgødninger og organiske gødninger (Møller et al., 2007).

Tabel 15. Indhold af tungmetaller i fiberfraktion fra separering af afgasset gylle (dekantercentrifugering) og halm samt i aske efter forbrænding af disse biomasser. Asken er enten opdelt i bundaske og flyveaske eller angivet analyseret som samlet aske. (Fra (Møller et al., 2007)). Desuden grænseværdier for indhold i halmaske jf. Bioaskebekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2019a) og for indhold i affald jf. Affald til jordbekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2018).

Biomassestype/asketype	Tungmetaller					
	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	(mg/kg tørstof)					
Biomasse før forbrænding						
Fiberfraktion, afgasset svinegylle	0,39	482	<0,1	10,4	2,62	1.270
Halm år 2003	0,10	2,5	<0,1	0,7	0,5	3,8
Halm år 2004	0,10	2,8				8,9
Bundaske						
Halm år 2003	0,12	16,1				17,8
Halm år 2004	0,15	93,2	0,1	3,3	1,8	40,7
Halm : fiber afgasset svinegylle (80:20%)	0,10	98				43
Halm : fiber afgasset svinegylle (80:20%)	0,09	144	<0,1	4,4	1,6	43
Flyveaske						
Halm år 2003	12,7	90,6				1.510
Halm år 2004	10,6	64,5	1,1	7,4	26,3	462
Halm : fiber afgasset svinegylle (80:20%)	9,4	111				4.430
Halm : fiber afgasset svinegylle (80:20%)	10,0	113	1,2	5,2	30,1	4.440
Samlet aske						
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 1	1,01	420		40	30	2.400
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 2	1,19	1.700		30		5.100
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 3		550		100	20	2.300

Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 4		230		30		1.400
Fiberfraktion, centrifugering, afgasset svinegylle 5	2,1	1.400		40	20	17.000
Fiberfraktion kemisk separering slagtesvin	77	460		20		2.500
Grænseværdi for halmaske jf. Bioaskebek.	5		0,8	60	120	
Grænseværdi for affald jf. Affald til jord-bek.	0,8	1.000	0,8	30	120	4.000

I et japansk studie af forbrænding af husdyrgødning fra kvæg, svin, æglæggende høns samt slagtekyllinger ved 700°C blev der bl.a. målt indhold af fosfor, zink og kobber i asken, og indholdet er vist i tabel 16 (Komiya et al., 2013). Indholdet af både zink og kobber var markant højere i aske fra svinegødning end fra de øvrige gødningstyper.

Tabel 16. Indhold af total-fosfor, zink og kobber i aske fra gødning fra kvæg, svin, æglæggende høns og slagtekyllinger, afbrændt ved 700°C. Japansk undersøgelse. Indholdet af zink og kobber er i kilden angivet på tørstofbasis og er her også omregnet til fosforbasis. (Data fra (Komiya et al., 2013)).

Biomassetype	Total-fosfor	Indhold på tørstofbasis		Indhold på fosforbasis	
		Zn	Cu	Zn	Cu
	(g/kg)	(mg/kg)		(mg/kg P)	
Kvæg 1	30,4	361	149	11.875	4.901
Kvæg 2	41,6	406	141	9.760	3.389
Svin 1	112	2.629	870	23.473	7.768
Svin 2	120	2.952	1.403	24.600	11.692
Æglæggere 1	66,9	1.173	127	17.534	1.898
Æglæggere 2	48,4	795	87	16.426	1.798
Slagtekyllinger 1	101	1.652	309	16.356	3.059

I forsøg ved Kommunekemi med forbrænding af fiberfraktion af gylle og afgasset gylle overskred indholdet af tungmetaller i aske Affald til jord-bekendtgørelsen grænseværdi for nikkel i tre af fire prøver og for krom, zink eller kobber i én af fire prøver, når indholdet blev beregnet på tørstofbasis (Birkmose & Zinck, 2008). Beregnet på fosforbasis blev grænseværdierne derimod ikke overskredet.

I et tysk forsøg med forbrænding af afgasset og tørret biomasse fra et biogasanlæg, der anvendte 7% fjerkrægødning og 93% plantemateriale, indeholdt asken <0,5 mg/kg cadmium, <0,1 mg/kg bly, <0,1 mg/kg kviksølv, 285 mg/kg nikkel og 184 mg/kg krom (Kratzeisen et al., 2010). Indholdet af nikkel og krom var dermed over grænseværdien både i forhold til tysk lovgivning for anvendelse som gødning og i forhold til den danske Bioaskebekendtgørelse. Med det ret lave indhold af fjerkrægødning i biomassen til biogasanlægget kan resultaterne næppe overføres til afgasset gylle med husdyrgødning som største biomasseandel.

I en svensk undersøgelse blev der lavet forsøg med forbrænding af dybstrøelse fra heste med en blanding af hestegødning og træspåner (40-80%) med et tørstofindhold på 43-51% (Lundgren & Pettersson, 2009). Indholdet af tungmetaller i asketørstof fra bundasken var <0,1 mg/kg for cadmium, 1.000 mg/kg for krom, 105 mg/kg for kobber, <0,1 mg/kg for kviksølv, 378 mg/kg for nikkel, 5,4 mg/kg for bly og 344 mg/kg for zink. Det vurderedes i undersøgelsen, at det høje indhold af nikkel og krom skyldtes forurening af asken med rustfrit stål fra kedlen. Flyveasken blev ikke analyseret.

Muligheden for at adskille asken i fraktioner af bundaske og flyveaske med forskellige koncentrationer af grundstoffer kan udgøre en mulighed for at adskille f.eks. fosfor fra tungmetaller, så fosforen kan bruges til gødningsformål, og fraktionen med tungmetaller kan deponeres. Dette vil kunne virke som et filter for tungmetaller fra landbruget (Schou et al., 2006).

Tidligere danske undersøgelser af aske fra halm- og flisfyrede kraftvarmeværker har vist, at flyveaske på tørstofbasis udgør mellem 13 og 34% af den samlede askemængde med en typisk andel på omkring 20% (Hansen, 2004). Generelt var koncentrationen af cadmium, bly og kviksølv lavest i bundaske, højere i cyklonaske (fraktion af flyveaske) og højest i filteraske/kondensatslam (slam udfældet fra kondenseret vand fra røggas). For krom og nikkel var variationen mindre, men koncentrationen generelt højest i cyklonaske (Hansen, 2004). For halmfyrede fjernvarmeværker varierede cadmiumindholdet i bundaske fra <0,1 til 1,0 mg pr. kg tørstof, men ofte med et indhold under 0,5 mg pr. kg tørstof (Hansen, 2004). For blandingsaske varierede cadmiumindholdet mellem 1,0 og 3,0 mg pr. kg tørstof, men typisk mellem 2,0 og 2,5 mg pr. kg tørstof, mens indholdet i filteraske varierede mellem 2 og 25 mg pr. kg tørstof, men typisk var mellem 5 og 20 mg pr. kg tørstof.

En anden tidligere dansk undersøgelse viste ligeledes lavest cadmiumindhold i bundaske fra både halm og træflis, højere indhold i cyklonaske og højest indhold i filteraske (for halm) og partikler i kondensat (for træflis) (Obernberger et al 1998, citeret i (Hansen, 2004). For blandingsaske blev der fundet typiske cadmiumindhold på 2 og 8 mg pr. kg tørstof for hhv. halmaske og træflisaske.

Delkonklusion

Aske fra husdyrgødning indeholder store mængder plantenæringsstoffer, såsom fosfor, kalium og magnesium, mens der kun er lille eller ingen gødningsmæssig effekt af kvælstof og svovl. Koncentrationen af næringsstoffer i asken varierer dog markant mellem typer af husdyrgødning, ligesom der er betydelige forskelle mellem bundaske og flyveaske. Plantetilgængeligheden af næringsstoffer i aske er generelt høj for kalium, men lav for f.eks. fosfor, og tilgængeligheden falder med stigende forbrændingstemperatur. Aske er derfor ikke egnet som startgødning, men kan fungere udmærket som langtidsvirkende gødning. Askesmeltepunktet varierer mellem gødningstyper med højt smeltepunkt for fjerkrægødning og lavere for f.eks. hestegødning og kvæggyllfiber, og lavt askesmeltepunkt kan gøre visse typer husdyrgødning til mere besværlige brændsler, da det lave smeltepunkt øger risikoen for sintring og slaggedannelse, hvilket er uønsket.

Husdyrgødning indeholder tungmetaller i varierende omfang, og da tungmetaller generelt forbliver i asken ved forbrænding, vil der også være tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning. Især synes der at være forhøjede koncentrationer af kobber og zink i aske fra forbrænding af gødning fra svin. Da visse tungmetaller kan fordampe under forbrænding, er der generelt fundet væsentligt højere koncentrationer af f.eks. cadmium i flyveasken end i bundasken. Adskillelse af asken i fraktioner udgør dermed en mulighed for at adskille f.eks. hovedparten af fosfor fra hovedparten af cadmium og andre tungmetaller med høj andel i flyveasken.

6.5 Viden om diverse miljøfremmede stoffer fra forbrænding af husdyrgødning

I dette afsnit gennemgås den fundne viden om miljøfremmede stoffer fra forbrænding af husdyrgødning. Afsnittet belyser indholdet af miljøfremmede forbindelser og patogener i husdyrgødning samt risiko for dannelse af PAH og dioxin ved forbrænding af husdyrgødning.

Miljøfremmede forbindelser og patogener i husdyrgødning

Husdyrgødning kan indeholde forskellige miljøfremmede stoffer, som er uønskede eller skadelige i høje koncentrationer (Schou et al., 2006; Schwärter & Grant, 2003). I en undersøgelse af 45 gylleprøver i 2002 er der i alle prøver fundet en eller flere af de 19 PAH-forbindelser, der blev analyseret for (Schwärter & Grant, 2003). Ud af de 19 PAH-forbindelser blev kun 14 fundet, og ingen prøver indeholdt koncentrationer over grænseværdien for spildevandsslam. Der blev også fundet detergenter i form af LAS og/eller alkohol-polyethoxylat i 84% af prøverne, og ingen af koncentrationerne af LAS lå over grænseværdien for slam (Schwärter & Grant, 2003). Der blev fundet antibiotika i 67% af prøverne (analyseret for 8 typer, ingen grænseværdi) og blødgørere med svage hormonlignende egenskaber (analyseret for DBP og DEHP) i 22% af prøverne, og grænseværdien for blødgørere i slam blev ikke overskredet. Der blev fundet nonylphenol-polyethoxylater i 20% af prøverne samt nonylphenoler med hormonlignende egenskaber i 5% af prøverne, og koncentrationen af sidstnævnte var under grænseværdien for slam.

Ved forbrænding antages organiske forbindelser, som medicinrester, plejemidler, hormoner og hormonlignende stoffer og rengøringsmidler m.v., at omdannes til mere harmløse forbindelser (Schou et al., 2006). Derfor forventes der ikke at være væsentlige risici mht. overførsel af sådanne indholdsstoffer fra husdyrgødning til asken. Der er heller ikke fundet eksempler i litteraturen vedr. undersøgelser af disse stoffer i aske fra forbrænding af husdyrgødning.

Rågylle fra husdyr indeholder en lang række mikroorganismer, hvoraf størstedelen udgøres af den naturlige og ufarlige tarmflora, men der vil herudover være varierende forekomst af mikroorganismer som bakterier, parasitter og virus, der kan være sygdomsfremkaldende for dyr og mennesker (Baggesen, 2005). Ud fra en smitemæssig vurdering er den almindeligt forekommende praksis for udbringning af gylle på landbrugsjord i nærområdet generelt accepteret som forsvarlig, dog kan der være krav om hygiejnisering (jf. 'Biproduktforordningen') ved transport over landegrænser (Baggesen, 2005). Ved forbrænding af fiberfraktionen af gylle eller afgasset gylle vil der ske et fuldstændigt drab af alle mikroorganismer, så en evt. risiko vil kun være relateret til transport samt risikoen for krydskontaminering på forbrændingsanlægget. Hvis anlæggene etableres efter gældende standarder og er inddelt i en ren og en uren del, vurderes risikoen for smittespredning generelt at være mindre end ved udbringning af gyllefiber direkte på marken uden hygiejnisering (Baggesen, 2005). Der forventes således ikke at være hygiejneproblemer vedrørende patogene mikroorganismer i aske efter forbrænding af husdyrgødning (Schou et al., 2006).

PAH og dioxin fra forbrænding af husdyrgødning

En teknologiudredning fra Miljøstyrelsen angiver, at forbrænding af husdyrgødning bl.a. kan medføre emissioner af miljøfremmede stoffer såsom PAH og dioxin, NO_x, SO_x og CO (Miljøstyrelsen, 2011). Emissionen vil afhænge af forbrændingseffektiviteten, forbrændingstemperaturen og gødningens vandindhold.

PAH er en gruppe organiske forbindelser, der også kaldes tjærestoffer, og som kan dannes under forbrænding af biomasse såsom træflis, og som kan være kræftfremkaldende (Skov & Ingerslev). Især kan en ufuldstændig forbrænding føre til dannelse af PAH, og da et lavt indhold af CO i røggassen indikerer en god forbrænding, vil PAH-udslippet være begrænset, hvis CO-niveauet er lavt (Skov & Ingerslev).

I en undersøgelse af halmfyrede og flisfyrede varmekæder er der generelt fundet lave PAH-indhold i bundaske med summen af 16 PAH'er på 0,1-1,2 mg pr. kg tørstof (Hansen, 2004). Indholdet af PAH'er var generelt lavest i bundaske, lidt højere i cyklonaske (fraktion af flyveaske) og højest i filteraske/kondensatslam (slam udfældet fra kondenseret vand fra røggas). Der er ikke fundet oplysninger i litteraturen vedr. PAH i aske fra forbrænding af husdyrgødning. Risikoen for PAH i aske fra husdyrgødning antages at være knyttet til evt. dårlig/ufuldstændig forbrænding, f.eks. ved for lavt tørstofindhold i husdyrgødningen, og dette understreger behovet for at sikre tilstrækkeligt højt tørstofindhold, enten ved iblanding af støttebrændsel eller ved tørring.

Dioxin er en miljøgift, der kan opstå ved forbrænding af biomasse med indhold af klor (Skov & Ingerslev). Analyser af dioxin er dyre, og bl.a. derfor er der generelt kun et begrænset datagrundlag, og der er ikke fundet undersøgelser vedr. dioxin fra forbrænding af husdyrgødning. Indholdet af dioxin kan variere betydeligt mellem askeprøver af f.eks. træflis (Skov & Ingerslev), men der er også fundet et generelt højere indhold af dioxin i danske flisaskeprøver sammenlignet med aske fra danske halmfyrede varmekæder (Hansen et al., 2004; Skov & Ingerslev). Der er også fundet et generelt højere indhold af dioxin i halmaske fra mindre gårdfyre end fra mindre varmekæder, men med betydelig variation mellem gårdfyrene (Hansen et al., 2004). Det gennemsnitlige indhold af dioxin var 3,7 ng/kg I-TEQ (internationale toksicitetsækvivalenter) i aske fra små halmfyrede gårdfyre, 0,6 ng/kg I-TEQ i aske fra mindre halmfyrede varmekæder og 18 ng/kg I-TEQ i aske fra træflisfyrede fyre (Hansen et al., 2004).

Klorindholdet er generelt højere i aske fra halm end fra træflis, med gennemsnitsværdier på hhv. 6,0% for halmaske (gnsn. af 27 prøver) og 0,38-0,44% for aske af træ og træflis (gnsn. af 7 og 4 prøver) (Vassilev et al., 2017). Da udvikling af dioxin ved forbrænding som nævnt er koblet til biomasse med indhold af klor, kan det overraske, at der er fundet et generelt højere dioxinindhold i aske fra træflis. I review'et af Vassilev et al. (Vassilev et al., 2017) er der ikke angivet klorindhold for aske af husdyrgødning. Det må formodes, at risikoen for dannelse af dioxin ved forbrænding af husdyrgødning bl.a. vil afhænge af klorindholdet i gødningen, og for husdyrgødning med stigende andel af halmstrøelse må risikoen forventes at nærme sig risikoen ved fyring med halm.

Delkonklusion

Der kan i husdyrgødning forekomme en række miljøfremmede og potentielt skadelige stoffer, f.eks. diverse PAH-forbindelser, LAS, antibiotika-rester, blødgørere med hormonlignende egenskaber m.v., ligesom der kan forekomme sygdomsfremkaldende mikroorganismer. Disse forbindelser og mikroorganismer forventes ved forbrænding at blive omdannet til harmløse forbindelser, og der vurderes derfor ikke at være potentielle problemer med disse i asken efter forbrænding af husdyrgødning.

PAH-forbindelser kan dannes under forbrænding af biomasse. Der er ikke fundet viden om PAH i aske fra forbrænding af husdyrgødning, men der vurderes at være en potentiel risiko i forbindelse med ufuldstændig forbrænding pga. for lavt tørstofindhold, og risikoen formodes at kunne minimeres enten ved iblanding af støttebrændsel eller tørring af husdyrgødningen før forbrænding. Dioxin kan dannes ved forbrænding af biomasse med indhold af klor. Der er ikke

fundet viden om risikoen for dioxin fra forbrænding af husdyrgødning, og risikoen må bl.a. formodes at afhænge af klorindholdet i gødningen, herunder klor fra halm som strøelse eller støttebrændsel.

6.6 Viden om emission af NO_x, CO og støv fra forbrænding af husdyrgødning

I dette afsnit gennemgås den fundne viden om skadelige indholdsstoffer i røggas fra forbrænding af husdyrgødning med fokus på NO_x, CO og støv.

NO_x, CO og støv

Kvælstof i brændslet kan ved forbrænding omdannes til enten frit kvælstof (N₂) eller kvælstof-oxider (NO_x, 'brændsels-NO_x'), og NO_x bidrager til luftforurening (Westborg et al., 2010). NO_x kan dog også dannes ved oxidation af frit kvælstof i forbrændingsluften ('termisk NO_x'). Generelt stiger NO_x-udledningen med stigende kvælstofindhold i brændslet, men NO_x-udledningen synes også at variere pga. andre forhold (Westborg et al., 2010). Kvælstofindholdet i biomassen antages dog at være af større betydning end forbrændingsanlæggets indretning, og der kan forventes problemer med NO_x-emission, hvis kvælstofindholdet i biomassen er over 0,6% på tørstofbasis (Mladenović et al., 2018). Fordelingen mellem de gasformige N-forbindelser vil være meget afhængig af forbrændingsteknologien og styringen af forbrændingen (Schou et al., 2006). På forbrændingsanlæg med god styring af forbrændingen vurderes NO_x at udgøre ca. 5% af den samlede afbrændte mængde N og resten emitteres som N₂, mens NO_x kan udgøre op til 10% fra værker med mindre præcis styring (Schou et al., 2006). Emissionen af NO_x med røggas fra forbrænding af husdyrgødning vil medføre deposition i området omkring skorstenen, men depositionen er lille sammenholdt med den generelle emission (Schou et al., 2006).

Selvom en meget stor del af fosfor og tungmetaller vil blive bundet i asken ved forbrænding, kan der emitteres en mindre del i flyveasken/støvet (Schou et al., 2006). Overslagsberegninger viser dog, at emissionen af fosfor og tungmetaller fra forbrænding maks. udgør 10% af den generelle deposition af disse stoffer, og ved røgrensning af hensyn til Affaldsforbrændingsdirektivet vil depositionen være endnu lavere (Schou et al., 2006).

I en tidligere dansk undersøgelse af brændselskvalitet af 8 typer af husdyrgødning blev der beregnet maksimalt mulig NO_x-udledning fra de 8 gødningstyper, dvs. hvis al kvælstof i gødningen blev omdannet til NO_x (Westborg et al., 2010). Hvis kvælstofindholdet i brændslet er lavt, udledes typisk op til 50% af den maksimale NO_x-udledning, mens der ved høje indhold i brændslet typisk kun udledes 5-10% af den maksimale NO_x-udledning. De teoretiske NO_x-udledninger fra de 8 husdyrgødningstyper er vist i tabel 17. Det konkluderes, at det er vanskeligt præcist at vurdere den samlede koncentration af NO_x i røggassen fra gødningstyperne, men at der for nogle gødningstyper såsom fjerkrægødning og gyllepiller vil være en risiko for dannelse af NO_x i større mængder end fra fyring med halm og andre velkendte brændsler (Westborg et al., 2010).

Tabel 17. Vurdering af niveau for mulig NO_x-koncentration i røggas ved forbrænding af 8 typer af husdyrgødning. (Fra (Westborg et al., 2010).

Gødningstype	Max. mulig N i røg	Max. mulig NO _x i røg	Hvis 5% af max. mulige NO _x i røg	Hvis 50% af max. mulige NO _x i røg
	(mg/m ₃ (n,t)/kg gødning v. 11% oxygen) ¹⁾			
1. Hestegødning	201	659	33	330
2. Kvæggyllefiber, fra Kemira	200	657	33	328
3. Svinegyllefiber, fra Samson-anlæg	459	1.509	75	755
4. Svinegyllefiber, fra Kemira-anlæg	455	1.495	75	747
5. Blandet gyllefiber efter afgasning	318	1.046	52	523
6. Rugeægshønegødning	2.146	7.050	352	3.525
7. Slagtekyllingegødning	2.864	9.409	470	4.705
8. Gyllepiller	896	2.944	147	1.472

¹⁾ (n,t) angiver, at der er tale om tør røggas ved normaltilstanden, dvs. ved en temperatur på 0°C og et tryk på 101.325 Pa.

I et dansk forsøg med forbrænding af svinegyllefiber eller afgasset fiber sammen med halm i en 200 kW stokerkedel blev der målt emission af støvpartikler, NO_x og N₂O (Kristensen et al., 2009). Støvemissionen varierede mellem 1.500-2.600 mg/m³, og emissionen steg med stigende andel af indfyret fiber. Til sammenligning var støvemissionen 650-876 mg/m₃ røg ved fyring med ren halm. Det vurderedes derfor, at der er behov for en form for røgrensning ved forbrænding af husdyrgødningsfibre, f.eks. en cyklon og et pose- eller elektrofilter eller en røg-vasker. Emissionen af NO_x i røggassen varierede mellem 350 og 460 ppm ved samfyring af halm og gyllefiber mod 430 ppm ved fyring med ren halm. Der var ikke tegn på, at stigende mængde gyllefiber øgede NO_x-emissionen, og temperaturen i brændkammeret vurderes i dette forsøg at være mere afgørende for NO_x-emissionen end fibermængden. Emissionen af lattergas (N₂O) i røggassen steg fra 1,5 ppm ved fyring med ren halm til 1,9 ppm ved fyring med halm og gyllefiber.

I danske forsøg med forbrænding af to typer svinegyllefiber (mellem 10 og 50% af brændselsmængden) sammen med træflis blev der målt emissioner af CO og NO_x (Skov & Jensen, 2015). Der blev målt varierende CO-emission pga. uens iblanding af gyllefibere, men i første forsøg (28% tørstof i fiberen, 10-25% iblanding af fiber) vurderedes det gennemsnitlige CO-niveau at være 64 mg CO/Nm³, og i andet forsøg (36% tørstof i fiberen, 10-50% iblanding af fiber) var gennemsnittet 447 mg CO/Nm³. I begge forsøg var CO-emissionen således væsentligt under de 625 mg CO/Nm³, som var grænseværdien for det pågældende værk. NO_x-emissionen blev målt til at være i gennemsnit 367 mg NO_x/Nm³ i første forsøg og 313 mg NO_x/Nm³ i andet forsøg, dvs. lidt over eller lige omkring grænseværdien på 300 mg/Nm³, som anlægget er godkendt til. Det konkluderedes, at NO_x-emissionen sandsynligvis kan blive afgørende for andelen af gyllefibere, der i praksis kan blandes i flis (Skov & Jensen, 2015).

I en dansk undersøgelse blev der afprøvet forbrænding af forskellige typer af gyllefiber i et kraftvarmeværk (12 MW), og der blev fyret med enten ren halm eller halm blandet med gyllefiber i forholdet 80:20% (Møller et al., 2007). Der blev ikke observeret nogen stigning i udledning af NO_x og heller ingen stigning i uforbrændt kulstof i asken ved forbrænding af halm+gyllefiber.

En tidligere dansk vurdering af den potentielle udledning af NO_x fra forbrænding af gyllefiber har været baseret på sammenligning med NO_x-emissionen ved forbrænding af halm, hvor 10% af kvælstoffet i halmen udledes som NO_x (Olesen & Sommer, 2005). Dette vil potentielt

medføre udledning af 0,47 og 0,37 kg NO_x pr. ton gylle ved afbrænding af fiberfraktionen fra hhv. svinegylle og afgasset gylle (Olesen & Sommer, 2005). Forsøg med forbrænding af halm tilført 20% gylle har dog ikke vist mærkbare forskelle i NO_x-emissionen (Olesen & Sommer, 2005). Det blev fremhævet, at der mangler kvantitativ information om emissioner af NO_x, SO₂, CH₄ og N₂O via røggasser ved forbrænding af husdyrgødning og fraktioner af husdyrgødning (Olesen & Sommer, 2005).

I et tysk forsøg med forbrænding af afgasset og tørret biomasse fra to biogasanlæg, der anvendte 93% plantebiomasse og 7% fjerkrægødning, var det gennemsnitlige indhold af CO 104 mg/m³ og 398 mg/m³ for NO_x (Kratzeisen et al., 2010). Emissionen af støv var 106 mg/m³ men blev reduceret til 43 mg/m³ efter rensning med et elektrostatisk filter. Det skal dog bemærkes, at der er tale om et meget lavt indhold af husdyrgødning.

I en svensk undersøgelse blev der lavet forsøg med forbrænding af dybstrøelse fra heste med en blanding af hestegødning og træspåner (40-80%) med et tørstofindhold på 43-51% (Lundgren & Pettersson, 2009). Indholdet af CO i røggassen var typisk 30-150 mg/m³ (forbrændingstemperatur 921-978°C), men med op til 460 mg/m³ i et enkelt forsøg, hvor forbrændingstemperaturen var lidt for lav (775°C). Indholdet af NO_x var typisk 280-350 mg/m³. Generelt var emissionerne af NO_x og CO noget højere end eller på niveau med emissionen fra forbrænding af træflis.

Delkonklusion

Ved forbrænding omdannes kvælstof i brændslet til enten frit kvælstof eller NO_x, og sidstnævnte bidrager til luftforureningen. Fordelingen mellem frit kvælstof og NO_x afhænger bl.a. af forbrændingsanlæggets indretning og styring, men generelt stiger NO_x-udledningen med stigende kvælstofindhold i brændslet. Ved forbrænding af husdyrgødning forventes derfor at være en risiko for øget NO_x-emission for gødningstyper med højt kvælstofindhold såsom fjerkrægødning. Ved forbrænding af husdyrgødning sammen med støttebrændsel vil NO_x-emissionen formodentlig også være påvirket af andelen af husdyrgødning, og grænseværdien for NO_x i røggas kan i praksis vise sig at være begrænsende for andelen af husdyrgødning i brændselsblandingen.

Emission af CO er generelt knyttet til for lav forbrændingstemperatur og ufuldstændig forbrænding, og stor CO-emission kan derfor også indikere risiko for emission af f.eks. PAH. De få hidtidige undersøgelser af forbrænding af husdyrgødning har generelt vist lave emissioner af CO. Generelt er der dog kun begrænset viden om CO-emissionen fra forskellige typer husdyrgødning.

Støvemission fra forbrænding af gyllefiber synes at være større end ved forbrænding af ren halm, hvorfor der ved forbrænding af gyllefiber kan være behov for røgrensning med cyklon og pose- eller elektrofilter.

6.7 Vurdering i forhold til Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen

I dette afsnit vurderes den fundne viden om forbrænding af husdyrgødning i forhold den nuværende Bioaskebekendtgørelse (Retsinformation.dk, 2019a). Afsnittet oprider de lovmæssige reguleringer af betydning for forbrænding af husdyrgødning samt opsummerer de fundne værdier for indholdet af tungmetaller i aske og emission af CO, PAH og NO_x og sætter disse i forhold til grænseværdier i Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen.

Lovgivningsmæssige reguleringer i forhold til forbrænding af husdyrgødning

Forordningen om animalske biprodukter nr. 1069/2009 (EUR-Lex, 2009) og tilhørende gennemførelsesforordning 142/2011 (EUR-Lex, 2011) samt ændring til denne (EUR-Lex, 2017) giver mulighed for at husdyrgødning på visse betingelser kan brændes på anlæg mindre end 50 MW eller på et affaldsforbrændingsanlæg godkendt i overensstemmelse med reglerne i bekendtgørelsen om anlæg der forbrænder affald (Retsinformation.dk, 2017). Bekendtgørelsen om miljøregulering af dyrehold og om opbevaring og anvendelse af gødning (husdyrgødningsbekendtgørelsen) (Retsinformation.dk, 2019b) giver ligeledes i §26, stk. 2, mulighed for at forbrænde husdyrgødning i et affaldsforbrændingsanlæg eller et anlæg godkendt efter artikel 24 i gennemførelsesforordningen (EUR-Lex, 2011). Nyttiggørelse af forbrændt husdyrgødning (bioaske) til jordbrugsformål er imidlertid endnu ikke endeligt afklaret, og dette projekt er en del af en sådan afklaring.

Udbringning af aske fra forbrænding af halm og træ er reguleret af Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål ('Bioaskebekendtgørelsen') (Retsinformation.dk, 2019a). Bioaskebekendtgørelsen angiver, at der maksimalt må udbringes 5 tons tørstof pr. ha pr. fem planperioder (dyrkningsår) på landbrugsjord og maksimalt 3 tons tørstof pr. ha pr. ti år i skov, dog maksimalt tre udspreddinger af 3 tons pr. 75 år. Endvidere angiver Bioaskebekendtgørelsen, at der maksimalt må tilføres 0,8 g cadmium pr. ha pr. planperiode til landbrugsjord eller maksimalt 4 g pr. ha over 5 år og for skovbrug maksimalt 60 g pr. ha pr. 75 år.

Udover disse doseringer af aske pr. ha angiver Bioaskebekendtgørelsen grænseværdier for koncentrationer af tungmetaller, som vist i tabel 18. Til sammenligning viser tabellen også grænseværdier for koncentration af tungmetaller ved anvendelse af affald til jordbrugsformål jf. Affald til jord-bekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2018). Bioaskebekendtgørelsen angiver grænseværdier for cadmium, krom, kviksølv, nikkel og bly i asketørstof. Affald til jord-bekendtgørelsen angiver grænseværdier for de samme tungmetaller, men også for zink og kobber. Affald til jord-bekendtgørelsen angiver desuden grænseværdier for cadmium, kviksølv, bly og nikkel både i forhold til tørstofindholdet og i forhold til fosforindholdet, og affaldsproducenten kan vælge, om man vil overholde enten de tørstofbaserede eller de fosforbaserede grænseværdier (Schou et al., 2006). For krom, zink og kobber er der dog kun angivet grænseværdier på tørstofbasis. Affald til jord-bekendtgørelsen angiver desuden, at der maksimalt må tilføres 7 tons tørstof pr. ha pr. år som gennemsnit over 10 år, dog 15 tons tørstof pr. ha pr. år i parker og skove (Retsinformation.dk, 2018).

Tabel 18. Grænseværdier for indhold af tungmetaller i aske fra forbrænding af halm og træflis jf. Bioaskebekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2019a) samt grænseværdier for tungmetaller i affald til jordbrugsformål jf. Affald til jord-bekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2018).

Tungmetal	Bioaskebekendtgørelsen		Affald til jord-bekendtgørelsen	
	Halmaske	Træaske		
	(mg/kg asketørstof)	(mg/kg asketørstof)	(mg/kg tørstof)	(mg/kg totalfosfor)
Cadmium (Cd)	5	20 ^{*)}	0,8	100
Krom (Cr)	100		100	-
Kviksølv (Hg)	0,8		0,8	200
Nikkel (Ni)	60		30	2.500
Bly (Pb)	120	120 (250 til skovbrug)	120	10.000
Kobber (Cu)	-		1.000	-
Zink (Zn)	-		4.000	-

^{*)} 5 mg/kg asketørstof for blandet halm- og træaske.

Udover dosering af aske og cadmium pr. ha samt koncentrationer af tungmetaller i asken angiver Bioaskebekendtgørelsen også en grænseværdi på 12 mg pr. kg asketørstof for summen af 9 polyaromatiske kulbrinter (PAH) i asken. Denne grænseværdi er koblet til måling af CO-indhold i røggassen; hvis der kontinuert måles CO-indhold, og hvis CO-koncentrationen er maksimalt 625 mg/m³ (ved 10% O₂) for halmaske og maksimalt 313 mg/m³ for træaske, så bortfalder kravet om analyse af PAH i aske.

Endelig angiver Bioaskebekendtgørelsen maksimale doseringer af træaske i skov afhængig af askens reaktivitet:

- Reaktivitet op til 2.800 mS/m: Maksimalt tilførsel af 3 tons aske pr. ha pr. ti år.
- Reaktivitet mellem 2.800 og 3.200 mS/m: Maksimalt tilførsel af 2 tons aske pr. ha pr. ti år.
- Reaktivitet mellem 3.200 og 3.600 mS/m: Maksimalt tilførsel af 1 tons aske pr. ha pr. ti år.

I modsætning til forbrænding af halm og træ reguleres forbrænding af husdyrgødning med den nuværende lovgivning af Bekendtgørelse om anlæg, der forbrænder affald ('Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen') (Retsinformation.dk, 2017) dvs. efter en strengere regulering end for forbrænding af halm og træ. Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen angiver krav om, at det samlede organiske kulstofindhold i slaggen og asken er under 3%, eller at glødetabet er under 5% af materialets tørvægt. Endvidere angiver bekendtgørelsen krav til målinger og grænseværdier for diverse emissioner til luft:

- Total støv
- Gasformige og dampformige organiske stoffer udtrykt som total organisk kulstof (TOC)
- Hydrogenklorid (HCl)
- Hydrogenfluorid (HF)
- Svovldioxid (SO₂)
- Nitrogenmonoxid (NO) og nitrogendioxid (NO₂) udtrykt som NO₂
- Tungmetaller (Cd, Tl, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)
- Dioxiner og furaner
- Carbonmonoxid (CO)

Anvendelse af bioaske er dog også reguleret af Husdyrgødningsbekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2019b), som bl.a. regulerer mængden af fosfor (fosforloftet), der må tilføres jorden i form af husdyrgødning, anden organisk gødning og bioaske. Mængden af bioaske,

der kan tilføres jorden, vil således også kunne begrænses af fosforloftet, som for nuværende er mellem 30 og 39 kg fosfor pr. ha pr. år bl.a. afhængig af dyreart og lokalitet.

Tungmetaller i aske

Ved jordbrugsmæssig anvendelse af aske fra forbrænding af husdyrgødning er der behov for at tage hensyn til både koncentrationen af tungmetaller i asken samt mængden af aske, cadmium og fosfor, der udbringes. Hvis aske fra husdyrgødning skulle anvendes efter Bioaskebekendtgørelsen, vil udbringningen kunne begrænses af følgende forhold:

- Koncentrationen af tungmetaller i asken jf. Bioaskebekendtgørelsen, f.eks. maks. 5 eller 20 mg cadmium pr. kg asketørstof.
- Mængden af cadmium i asken jf. Bioaskebekendtgørelsen, dvs. maks. 0,8 g pr. ha pr. år eller 4 g pr. ha i gennemsnit over 5 år.
- Mængden af aske der må udbringes pr. ha jf. Bioaskebekendtgørelsen, dvs. maks. 5 tons pr. ha pr. 5 år eller 1 ton pr. ha pr. år.
- Mængden af fosfor der må udbringes pr. ha jf. Husdyrgødningsbekendtgørelsen, dvs. maks. 30-39 kg pr. ha pr. år på bedriftsniveau.

Hvis aske fra husdyrgødning skulle anvendes efter Affald til jord-bekendtgørelsen, vil udbringningen kunne begrænses af følgende forhold:

- Koncentrationen af tungmetaller i asken jf. Affald til jord-bekendtgørelsen, f.eks. maks. 0,8 mg cadmium pr. kg asketørstof eller 100 mg cadmium pr. kg fosfor.
- Mængden af aske der må udbringes pr. ha jf. Affald til jord-bekendtgørelsen, dvs. maks. 7 tons pr. ha pr. år som gennemsnit over 10 år.
- Mængden af fosfor der må udbringes pr. ha jf. Husdyrgødningsbekendtgørelsen, dvs. maks. 30-39 kg pr. ha pr. år på bedriftsniveau.

Koncentrationen af tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning fra forskellige studier (jf. tidligere gennemgåede eksempler) er opsummeret i tabel 19, hvor koncentrationen er omregnet til procent af grænseværdierne i hhv. Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen. I langt de fleste tilfælde er koncentrationen af tungmetaller væsentligt under grænseværdierne i begge bekendtgørelser, dvs. værdierne i tabellen er under 100%. Der er dog væsentlige undtagelser:

Flyveaske af halm+fiberfraktion med 20% fiberfraktion fra afgasset svinegylle (Møller et al., 2007):

- Indholdet af cadmium var 88-99% højere end grænseværdien på tørstofbasis og 213-275% over grænseværdien på fosforbasis.
- Indholdet af kviksølv var 50% højere end grænseværdien på tørstofbasis.
- Indholdet af zink var 11% højere end grænseværdien på tørstofbasis.

Samlet askemængde fra svinegyllefiber (Møller et al., 2007; Thygesen & Johnsen, 2012; Westborg et al., 2010):

- Indholdet af kobber overskred i flere studier grænseværdien med op til 27-79%, men der var også værdier på ned til 77% under grænseværdien.
- Indholdet af zink overskred i flere studier grænseværdien med op til 7-325% men også med værdier ned til 65% under grænseværdien.
- Indholdet af nikkel overskred i nogle tilfælde grænseværdien på tørstofbasis med op til 7-67%, men der var også værdier ned til 25% under grænseværdien. Nikkelindholdet overskred ikke grænseværdierne på fosforbasis.

Aske fra dybstrøelse fra heste (Lundgren & Pettersson, 2009):

- Nikkelindholdet overskred grænseværdien med 530% på tørstofbasis og 675% på fosforbasis. Det antoges dog, at det høje indhold skyldtes forurening fra rustfrit stål fra kedlen.

Samlet set viser de fundne værdier, at koncentrationerne af tungmetaller i aske fra de fleste gødningstyper holder sig under grænseværdierne jf. Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen, dog overskrider aske fra svinegyllefiber grænseværdierne for kobber og zink i en del tilfælde og for nikkel i nogle tilfælde. Hvis aske fra forbrænding af husdyrgødning opdeles i bundaske og flyveaske, vil der kunne være betydelige forskelle i koncentrationen mellem fraktionerne med især højere indhold af cadmium i flyveasken. Når koncentrationen af tungmetaller beregnes på fosforbasis, udgør indholdet af kviksølv, nikkel og bly generelt en lavere andel af grænseværdien jf. Affald til jord-bekendtgørelsen bekendtgørelsen sammenlignet med den tørstofbaserede grænseværdi.

Tabel 19. Grænseværdi for indhold af tungmetaller i aske fra forbrænding af halm jf. Bioaskebekendtgørelsen (på basis af asketørstof) og i aske fra forbrænding af affald jf. Affald til jord-bekendtgørelsen (på basis af fosforindhold eller tørstofindhold) samt indhold af tungmetaller i aske af husdyrgødning m.v. fra diverse undersøgelser, omregnet til procent af grænseværdien. Hvor der indenfor samme undersøgelse er flere værdier for en given biomassetype/gødningstype, er der hvis muligt angivet minimum- og maksimumværdier. Bioaskebekendtgørelsen angiver separate grænseværdier træaske for tungmetallerne bly og cadmium med hhv. 250 og 20 mg pr. kg asketørstof; hvis en aske fra forbrænding af husdyrgødning overholder grænseværdierne for halmaske, vil grænseværdierne for træaske derfor også overholdes.

Biomasse/gødningstype	Antal typer/prøver	Kilde		Grænseværdi for halmaske jf. Bioaske-bekendtgørelsen					Grænseværdi for affald til jordbrugsformål jf. Affald til jord-bekendtgørelsen					
				Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cu	Zn
				(mg/kg aske)					(mg/kg P)				(mg/kg aske)	
Grænseværdier		Retsinformation, 2018, 2019		5	100	0,8	60	120	100	200	2.500	10.000	1.000	4.000
<i>Procent af grænseværdi</i>														
Hestegødning	1	Westborg et al., 2010	Gnsn.	21%	42%	29%	37%	4%	22%	2%	18%	1,1%	40%	38%
Kvæggyllefiber	1		Gnsn.	23%	29%	14%	37%	7%	34%	2%	26%	2,6%	18%	26%
Svinegyllefiber	1		Gnsn.	27%	72%	<8%	132%	9%	20%	<0,4%	45%	1,5%	179%	258%
Svinegyllefiber, m. polymer	1		Gnsn.	39%	49%	10%	75%	4%	15%	0%	14%	0,4%	139%	168%
Blandet gyllefiber efter afgasning	1		Gnsn.	13%	48%	13%	73%	4%	6%	0%	16%	0,5%	48%	65%
Rugeægshønegødning	1		Gnsn.	21%	15%	2%	31%	2%	27%	0%	19%	0,7%	15%	25%
Slagtekyllingegødning	1		Gnsn.	27%	27%	<6%	50%	3%	16%	<0,3%	15%	0,4%	73%	88%
Gyllepiller	1		Gnsn.	12%	70%	7%	77%	7%	6%	0%	18%	0,8%	36%	81%
Aske af svinegyllefiber	1	Skov & Jensen, 2015	Gnsn.	130%	-	-	-	20%	66%	-	-	2%	-	44%

Bundaske, halm	2	Møller et al., 2007	Min.	2%	-	13%	6%	2%	10%	5%	14%	2%	2%	0%
			Maks.	3%	-	13%	6%	2%	16%	5%	14%	2%	9%	1%
Bundaske, halm:fiber afgangset svinegylle (80:20)	2		Min.	2%	-	<13%	7%	1%	4%	-	9%	1%	10%	1%
			Maks.	2%	-	<13%	7%	1%	5%	-	9%	1%	14%	1%
Flyveaske, halm	2		Min.	212%	-	138%	12%	22%	502%	31%	17%	15%	6%	12%
			Maks.	254%	-	138%	12%	22%	596%	31%	17%	15%	9%	38%
Flyveaske, halm:fiber afgangset svinegylle (80:20)	2		Min.	188%	-	150%	9%	25%	313%	19%	7%	9%	11%	111%
			Maks.	199%	-	150%	9%	25%	375%	19%	7%	9%	11%	111%
Samlet aske, fiber fra afgangset svinegylle, centrifugering	3-5		Min.	20%	-	-	50%	17%	8%	-	8%	2%	23%	35%
			Maks.	41%	-	-	167%	25%	17%	-	38%	4%	170%	425%

Afgasset fiber	8	Thygesen & Johnsen, 2012	Gnsn.	-	28%	-	67%	-	-	-	14%	-	79%	66%
Svinegyllefiber	22		Gnsn.	-	29%	-	107%	-	-	-	21%	-	127%	107%
Minkgyllefiber	3		Gnsn.	-	-	-	19%	-	-	-	3%	-	4%	16%
Kvæggyllefiber	3		Gnsn.	-	19%	-	35%	-	-	-	17%	-	36%	24%
Kvæg (Japan)	2	Komiyama et al., 2013	Gnsn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10%	15%
Svin (Japan)	2		Gnsn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70%	114%
Æglæggende høns (Japan)	2		Gnsn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25%	11%
Slagtekyllinger (Japan)	1		Gnsn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41%	31%
Dybstrøelse fra heste (Sverige)	1	Lundgren & Pettersson, 2009	Gnsn.	<2%	1.000%	<13%	630%	5%	<5%	<3%	775%	3%	11%	9%

Udover hensyn til koncentrationen af tungmetaller i asken skal der som nævnt også tages hensyn til udbragte mængder af aske, fosfor og cadmium pr. ha. Med udgangspunkt i de fundne værdier for indhold af fosfor og tungmetaller i asketørstof i de gennemgåede danske studier af forbrænding af husdyrgødning er der i tabel 20 beregnet, hvor store mængder aske og tungmetaller, der udbringes ved udbringning af 30 kg fosfor pr. ha pr. år, som svarer til fosforloftet på en del marker og bedriftstyper. Det fremgår, at for aske fra ren husdyrgødning overstiger askemængden i eksemplerne ikke 1 ton pr. ha pr. år, som er den maksimale mængde jf. Bioaskebekendtgørelsen. For aske fra forbrænding af halm eller halm sammen med husdyrgødning overstiger askemængden derimod 1 ton pr. ha pr. år pga. det lavere indhold af fosfor i halmaske. Den udbragte mængde af cadmium er i alle tilfælde under grænseværdien på 0,8 g pr. ha pr. år med undtagelse af en enkelt værdi for aske fra kvæggyllefiber, hvor mængden er 1,03 g pr. ha pr. år, hvilket skyldes et lavere fosforindhold i kvæggyllefiber. Generelt synes udbringning af aske fra husdyrgødning primært at blive begrænset af fosformængden snarere end askemængden og cadmiummængden. Det skal dog nævnes, at fosforloftet gælder på bedriftsniveau og ikke på enkeltmarkniveau. Derved kan der principielt tilføres større fosformængder på enkeltmarker indenfor bedriften, og i så fald vil grænseværdien for askemængde eller cadmiummængde pr. ha blive relevant.

Tabel 20. Beregning af teoretiske mængder af udbragt aske og tungmetaller i aske, hvis aske fra husdyrgødning tilføres svarende til 30 kg fosfor pr. ha. Beregnet ud fra indhold af fosfor og tungmetaller i aske af husdyrgødning fra diverse undersøgelser. Hvor der indenfor samme undersøgelse er flere værdier for en given biomasse/gødningstype, er der, hvis muligt, angivet minimum- og maksimumværdier.

Biomasse/gødningstype	Antal typer/prøver	Kilde		Udbragt mængde pr. ha								
				Fosfor	Aske-tørstof	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Cu	Zn
				(kg/ha)		(g/ha)						
Hestegødning	1	Westborg et al., 2010	Gnsn.	30	625	0,67	27	0,15	14	3,3	248	942
Kvæggyllefiber	1		Gnsn.	30	893	1,03	26	0,10	20	7,9	160	940
Svinegyllefiber	1		Gnsn.	30	430	0,59	31	<0,03	34	4,4	769	4.432
Svinegyllefiber, m. polymer	1		Gnsn.	30	229	0,44	11	0,02	10	1,2	319	1.541
Blandet gyllefiber efter afgangning	1		Gnsn.	30	275	0,18	13	0,03	12	1,5	133	715
Rugeægshønegødning	1		Gnsn.	30	747	0,80	11	0,01	14	2,1	113	739
Slagtekyllingegødning	1		Gnsn.	30	362	0,49	10	<0,02	11	1,2	265	1.277
Gyllepiller	1		Gnsn.	30	299	0,18	21	0,02	14	2,5	107	971
Aske af svinegyllefiber	1	Skov & Jensen, 2015	Gnsn.	30	305	1,98	-	-	-	7,1	-	536
Bundaske, halm	2		Min.	30	2.600	0,3		0	0	0	42	46
			Maks.	30	3.254	0,5		0	11	6	303	132
Bundaske, halm:fiber afgasset svi-negylle (80:20)	2		Min.	30	1.225	0,1		0,0	0	0	120	53
			Maks.	30	1.531	0,1		<0,15	7	2	220	66
Flyveaske, halm	2		Min.	30	1.185	15		0	0	0	107	779

			Maks.	30	1.685	18		2	12	44	109	1.790
Flyveaske, halm:fiber afgasset svinegylle (80:20)	2		Min.	30	942	9		0	0	0	106	4.182
			Maks.	30	1.196	11		1	5	28	133	5.297
Samlet aske, fiber fra afgasset svinegylle, centrifugering	3-5		Min.	30	200	0,2		0	6	0	78	477
			Maks.	30	366	0,5		0	29	11	350	4.250
Afgasset fiber	8	Thygesen & Johnsen, 2012	Gnsn.	30	268	-	7,4	-	10,8	-	211	705
Svinegyllefiber	22		Gnsn.	30	244	-	7,1	-	15,6	-	310	1.047
Minkgyllefiber	3		Gnsn.	30	191	-	-	-	2,2	-	8	119
Kvæggyllefiber	3		Gnsn.	30	588	-	11,2	-	12,5	-	213	564

Samlet set synes udbringning af aske fra husdyrgødning derfor primært at ville være begrænset af fosformængden snarere end askemængden og cadmiummængden. Desuden vil aske af svinegyllefiber som nævnt kunne have relativt høje koncentrationer af kobber og zink, som kan overskride grænseværdierne angivet i Affald til jord-bekendtgørelsen. Pt. er der dog kun angivet grænseværdier for kobber og zink på tørstofbasis, og det kan ligeledes overvejes at belyse muligheden og relevansen af fosforbaserede grænseværdier for kobber og zink.

Det har tidligere været foreslået, at Affald til jord-bekendtgørelsens grænseværdier for tungmetaller må forudsættes overholdt ved anvendelse af asken til jordbrugsformål (Arbejdsgruppen, 2005), ligesom det har været foreslået at overveje en grænseværdi for kobber i Bioaskebekendtgørelsen (Petersen et al., 2005). Den fremtidige lovgivning og praksis for anvendelse af zink og kobber i foder kan få væsentlig indflydelse på indholdet af disse tungmetaller i husdyrgødningen og dermed i asken ved forbrænding. Da der er forventning om restriktioner i anvendelsen af zink og kobber, må dette på sigt forventes at reducere indholdet i gødningen. Ligeledes vil anvendelse af støttebrændsel, såsom halm eller træflis især sammen med svinegyllefiber, kunne forventes at sænke koncentrationen af kobber og zink i asken.

Det er tidligere anført, at der er meget lav tilgængelighed af cadmium i bioaske og lav optagelse i planter (Li et al., 2016; Sørensen, 2018), og det kan derfor overvejes med en højere tilførselsgrænse for aske (Sørensen, 2018). Det skal også bemærkes, at en opdeling af aske i fraktioner kan udgøre en mulighed for at påvirke koncentrationen af især cadmium i askefraktionerne.

Ved forbrænding af husdyrgødning og udbringning af aske på landbrugsjord vil der samlet set ikke blive udbragt en større mængde tungmetaller end, hvis husdyrgødningen blev udbragt direkte uden forbrænding. Der er derfor primært behov for at sørge for en tilstrækkelig god fordeling af asken. Derudover udgør forbrænding af husdyrgødning en mulighed for at få visse tungmetaller ud af kredsløbet ved at deponere eller behandle flyveasken.

Da kaliumindholdet også generelt er højt i aske, er det ved udbringning af aske også vigtigt at tage hensyn til kaliumindholdet, så den anbefalede kaliumgødskning ikke overskrides (Li et al., 2016). Mængden af kalium udbragt med aske fra husdyrgødning er dog ikke nærmere belyst her.

Emission af CO, PAH og NO_x

Der er relativt få målinger af emission af CO, NO_x og støv fra forbrænding af husdyrgødning, og de væsentligste er opsummeret i tabel 21. Der er ikke fundet undersøgelser af PAH i aske fra husdyrgødning. Emissionen af CO er i alle tilfælde under Bioaskebekendtgørelse grænseværdi på 625 mg pr. m³ for forbrænding af halm, mens grænseværdien på 313 mg pr. m³ for forbrænding af træ er overskredet i et par tilfælde. Høj emission af CO fra forbrænding kan bl.a. være knyttet til dårlig forbrænding pga. for lavt tørstofindhold, og det vurderes derfor at være væsentligt at sikre et tilstrækkeligt højt tørstofindhold ved forbrænding af husdyrgødning for at kunne overholde grænseværdien i Bioaskebekendtgørelsen. Dette vil samtidig være med til at forebygge mod indhold af PAH i aske fra husdyrgødning.

Der er ingen grænseværdier for emission af NO_x i Bioaskebekendtgørelsen, men emissionen af NO_x er for de fleste af de fundne værdier over Affaldsforbrændingsbekendtgørelsens grænseværdi på 200 mg pr. m³ (tabel 21). Dette er formodentlig knyttet til det højere indhold af kvælstof i husdyrgødning end i både halm og træflis.

Der er i enkelte studier målt emission af støv fra forbrænding af husdyrgødning (tabel 21). Der er ingen grænseværdier for støvemission i Bioaskebekendtgørelsen, men støvemissionen er i de fleste tilfælde over grænseværdien i Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen.

Tabel 21. Emissioner fra forbrænding af husdyrgødning fra diverse undersøgelser samt grænseværdier angivet i Bioaskebekendtgørelsen og Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen.

Biomasse/gødningstype	Kilde	Emissioner fra forbrænding			
		CO	PAH	NO _x	Total støv
		(mg/m ³)	(mg/kg tørstof)	(mg/m ³)	(mg/m ³)
Grænseværdi for halmaske, Bioaskebekendtgørelsen	Retsinformation, 2019	625	12	-	-
Grænseværdi for træaske, Bioaskebekendtgørelsen	Retsinformation, 2019	313	12	-	-
Grænseværdi for affald (døgnmiddel), Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen	Retsinformation, 2017	50		200	10
Aske af træflis + svinegyllefiber, type 1 (10-25%)	Skov & Jensen, 2015	Gnsn.	64	-	367
Aske af træflis + svinegyllefiber, type 2 (10-50%)	Skov & Jensen, 2015	Gnsn.	447	-	313
Gyllefiber, svin, afgasset gylle	Kristensen et al., 2009	Min.		350	1500
		Maks.		460	2600
Halm	Kristensen et al., 2009x	Min.		430	650
		Maks.		430	876
Fjerkrægødning (Skotland)	(Green, 2008)	Min.	5	121	3,1
		Maks.	<8	228	16
Afgasset biomasse, 100% plantebiomasse (Tyskland)	Kratzeisen et al., 2010		275	334	100
Afgasset biomasse, 7% fjerkrægødning (Tyskland)			105	398	106
Dybstrøelse fra heste (Sverige)	Lundgren & Pettersson, 2009	Min.	ca. 30	280	
		Maks.	ca. 460	350	

6.8 Konklusion fra litteraturstudiet

Litteraturgennemgangen vedr. forbrænding af husdyrgødning viser bl.a. følgende:

- Der er store mængder af husdyrgødning, der potentielt kan anvendes til forbrænding. Incitamentet for forbrænding af husdyrgødning vil ofte være knyttet til næringsstofforhold, især det såkaldte fosforloft for gødskning med fosfor.
- For de meget tørre gødningstyper som hestegødning og fjerkrædybstrøelse kan der være et økonomisk incitament for forbrænding i form af besparelse på indkøb af energi, hvis varmen fra forbrænding af gødningen kan afsættes eller anvendes på egen bedrift.
- For de fleste typer husdyrgødning vil der være behov for forbehandling af husdyrgødningen forud for forbrænding for at nå et tilstrækkeligt højt tørstofindhold og dermed en god forbrænding. Separering af gylle eller afgasset gylle i en fiberfraktion og en væskefraktion kan øge tørstofindholdet i fiberfraktionen en del, men der vil generelt være behov for at øge tørstofindholdet yderligere ved f.eks. tørring eller anvendelse af mere tørt støttebrændsel.
- Ved forbrænding af husdyrgødning forsvinder stort set al kvælstof, men der vil være andre vigtige plantenæringsstoffer i aske, ikke mindst fosfor og kalium. Plantetilgængeligheden af især fosfor er ofte relativt lav i aske fra forbrænding, men næringsstofferne forventes frigivet over tid.
- Husdyrgødning indeholder i varierende omfang tungmetaller, og da tungmetaller overvejende forbliver i asken efter forbrænding, vil der ske en opkoncentrering af tungmetaller på samme måde som med f.eks. fosfor og andre næringsstoffer. Der er fundet tungmetaller i aske fra forbrænding af husdyrgødning, især med høje indhold af kobber og zink fra svinegylle og især i fiberfraktionen ved separering med polymerer. For visse tungmetaller, såsom cadmium, zink og bly, er koncentrationen højere i flyveaske end i bundaske.
- Miljøfremmede stoffer som PAH, LAS, antibiotikarester m.m. samt patogener kan forekomme i husdyrgødning, men forventes ved forbrænding nedbrudt til harmløse forbindelser. Ved forbrænding kan der til gengæld også dannes uønskede stoffer som PAH og dioxin, men der er ikke fundet konkrete undersøgelser af dette for forbrænding af husdyrgødning.
- Ved forbrænding omdannes kvælstof i brændslet til frit kvælstof eller NO_x , og med et højere indhold af kvælstof i husdyrgødning end i f.eks. halm og træ vil der være en potentiel risiko for øget emission af NO_x ved forbrænding af husdyrgødning. Emissionen vil dog afhænge af forbrændingsteknologi og evt. iblanding af støttebrændsel.
- Emission af CO fra forbrænding er typisk knyttet til dårlig forbrænding pga. for lavt tørstofindhold og for lav forbrændingstemperatur. Hidtidige undersøgelser af forbrænding af husdyrgødning viser generelt lav emission af CO, men det vurderes at være vigtigt at sikre et højt tørstofindhold ved forbrænding af husdyrgødning.
- Der kan forekomme højere emission af støv ved forbrænding af husdyrgødning såsom gylle-fiber sammenlignet med halm.
- Forbrænding af husdyrgødning og anvendelse af asken er omfattet af en række lovgivningsmæssige reguleringer. Anvendelse af aske fra husdyrgødning til jordbrugsformål er bl.a. reguleret mht. koncentration af tungmetaller i asken samt udbragt mængde af aske, cadmium og fosfor pr. ha.
- Generelt overholder aske fra husdyrgødning grænseværdierne for tungmetaller i Bioaskebekendtgørelsen, dog er cadmiumindholdet i flyveaske generelt for højt. Indholdet af kobber og zink i aske fra svinegyllefiber overskrider dog i en del tilfælde grænseværdien i Affald til jordbekendtgørelsen.
- Deponering eller oprensning af flyveaske kan få tungmetaller ud af kredsløbet.
- Den mulige mængde aske fra husdyrgødning, der kan udbringes pr. ha, vil primært være begrænset af mængden af fosfor; ved udbringning af aske svarende til 30 kg fosfor pr. ha på bedriftsniveau vil grænseværdierne for 1 ton aske og 0,8 g cadmium pr. ha pr. år sjældent overskrides. På enkeltmarkniveau kan grænseværdierne for mængden af aske og cadmium dog være relevante.

- De få fundne værdier for emission af CO fra forbrænding af husdyrgødning er under grænseværdien for halm i Bioaskebekendtgørelsen. De få fundne værdier for emission af NO_x og støv er generelt over grænseværdierne i Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen.

7. Forbrændingsforsøg

7.1 Metodebeskrivelse

Biomasser og forbehandling før forbrændingsforsøget

Der er i forbrændingsforsøget afprøvet en række biomasser og biomasseblandinger som angivet i tabel 22. Tørstofindholdet i biomasserne blev bestemt ved tørring ved 105°C indtil konstant vægt, og tabel 22 viser tørstofindholdet som anvendt ved forbrændingsforsøgene. Der er desuden udført standard gødningsanalyse (udført af Eurofins) for de fem rene biomasser, dvs. på prøver udtaget før tørring eller opblanding med halmpiller. Endvidere er der af Teknologisk Institut lavet analyse af askeindhold i disse prøver ved foraskning ved 550° C indtil konstant vægt samt et estimat af densiteten. Indholdet af næringsstofferne kvælstof, fosfor og kalium samt aske er vist i tabel 23.

TABEL 22. Biomasser og biomasseblandinger anvendt i forbrændingsforsøg. Tørstofindholdet angiver gennemsnit af to gentagelser pr. type.

Biomassetype / biomasseblanding (råvare-andele i blandinger)	Tørstofindhold (% og std. afv.)	Biomassens oprindelse
1. Kyllingemøg (økologisk)	72,1 (±0,2)	Rokkedahl Kylling, Nibe
2. Hestemøg, tørret og briketteret	88,3 (±0,3)	Ecodyring, Brædstrup
3. Sogyllle-fiber, tørret	67,0 (±1,7)	Per Fuglsang, Silkeborg
4. Sogyllle-fiber + halmpiller (30:70)	69,3 (±0,3)	Per Fuglsang, Silkeborg
5. Biogas-fiber, tørret	57,4 (±0,6)	AUs biogasanlæg, Foulum
6. Biogas-fiber + halmpiller (42:58)	65,0 (±1,0)	AUs biogasanlæg, Foulum
7. Halmpiller	90,3 (±0,6)	SJS Pellets, Løgumkloster

TABEL 23. Indhold af tørstof, aske og kvælstof, fosfor og kalium i gødningstyperne før tørring eller opblanding med halmpiller. Næringsstofindholdet er angivet både på tørstofbasis (% i TS) og friskvægtbasis (kg/ton). Værdierne er baseret på én gentagelse pr. type.

Biomassetyper	Tørstofindhold	Total-N		NH ₄ -N		Total-P		Total-K		Aske	
	%	(% i TS)	(kg/ton)	(% i TS)	(kg/ton)	(% i TS)	(kg/ton)	(% i TS)	(kg/ton)	(% i TS)	(kg/ton)
1. Kyllingemøg (økologisk)	71,7	4,52	32,4	0,88	6,3	1,40	10,0	2,40	17,2	19,1	191
2. Hestemøg, tørret og briketteret	89,9	0,77	6,9	0,07	0,6	0,10	0,9	1,40	12,6	5,4	54
3. Sogyllle-fiber, før tørring	23,7	1,81	4,3	0,81	1,9	1,70	4,0	0,55	1,3	23,2	232
5. Biogas-fiber, før tørring	41,6	1,51	6,3	0,31	1,3	0,26	1,1	0,53	2,2	10,2	102
7. Halmpiller	91,7	0,79	7,2	0,06	0,6	0,09	0,8	1,30	11,9	6,6	66

Følgende kommentarer kan knyttes til biomasserne og forbehandlingen før forbrændingsforsøget:

Kyllingemøg: Der blev anvendt økologisk kyllingemøg fra kyllingeproducenten Rokkedahl Kylling ved Nibe, modtaget 24/9 2019. Gødningen havde et højt tørstofindhold på 72,1% og kræver derfor ikke iblanding af støttebrændsel. For at sikre en jævn indfødning af den relativt heterogene biomasse i kedlen, blev biomassen snittet/blandet i en foderblander af mærket Seko. Dette blev udført ved Aarhus Universitet i Foulum i samarbejde med virksomheden Advanced Substrate Technology.



Kyllingemøg før neddeling (t.v.) og under neddeling (t.h.). (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).

Hestemøg: Der blev anvendt tørret, briketteret hestegødning fra Ecodrying ved Brædstrup, modtaget 4/10 2019. I tørringsprocessen opvarmes hestegødningen til 190°C i 1-2 timer, og dampen suges ud. Efterfølgende er gødningen presset i briketter med en diameter på 7-8 cm og en længde på typisk 5-10 cm. Tørstofindholdet i de anvendte briketter var 88,3%.



Tørret og briketteret hestemøg. (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).

Sogyllefiber: Der blev anvendt fiberfraktion af sogylle fra svineproducenten Per Fuglsang ved Silkeborg, som har konventionel svineproduktion. Gyllen bestod primært af sogylle, vurderet til ca. 80%, og resten – ca. 20% - smågrisegylle.

Gyllen blev separeret på gården med en skruepresse af mærket Scud 6000, og tørstofindholdet i fiberfraktionen var 23%. Fiberfraktionen blev modtaget 24/9 2019.

Til forbrænding af ren sogyllefiber blev en mængde på ca. 1½ m³ tørret i to trin, der begge blev udført ved Aarhus Universitet i Foulum i samarbejde med virksomheden Advanced Substrate Technology: Først blev tørstofindholdet hævet til ca. 33% vha. en dobbelt-skruepresse af mærket GS Twin Screw Press. Dernæst blev biomassen tørret vha. varm luft (op til 70°C) i et anlæg udviklet af Advanced Substrate Technology til et endeligt tørstofindhold på 67%.

Til forbrænding af sogyllefiber i blanding med halm blev sogyllefiber (23% tørstof) opblandet med halmpiller (90,3% tørstof) i råvareforholdet 30% sogyllefiber og 70% halmpiller. I tørstofandel svarer det til 9,9% fra sogyllefiber og 90,1% fra halmpiller. De to biomasser blev blandet i det nævnte forhold vha. en cementblander, hvor der blev blandet partier à 13 kg sogylle-fiber og 30 kg halmpiller. Tørstofindholdet i blandingen blev efter et døgn målt til 69,3%.



Sogylle-fiber før dobbeltskruepresning (t.v.) og under dobbeltskruepresning (t.h.). (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).



Blanding af sogylle-fiber og halmpiller umiddelbart efter opblandingen. (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).

Biogasfiber: Der blev anvendt fiberfraktion fra Aarhus Universitets biogasanlæg ved Foulum. Biogasanlægget anvender kun biomasser, der figurerer på bioaskebekendtgørelsens bilag 1, og biomassen består overvejende af kvæggylle og dybstrøelse fra kvæg samt en mindre andel af minkgylle, svinegylle og græsensilage. Det blev vurderet, at der i perioden op til udtagning af fiberen til forbrændingsforsøget er anvendt minimum 80% gylle og dybstrøelse fra kvæg som biomasse til anlægget. Fiberfraktionen blev separeret fra med en skruepresse af mærket Börger.

Til forbrænding af ren biogasfiber blev en mængde fiberfraktion fra skruepressen yderligere tørret i to trin på samme måde som beskrevet for sogyllefiber. Tørstofindholdet efter presning i dobbeltskruepressen var 42,7%, og efter tørring med varm luft var tørstofindholdet 57,4%.

Til forbrænding af biogasfiber i blanding med halm blev biogasfiber fra dobbeltskruepressen (42,7% tørstof), opblandet med halmpiller (93,3% tørstof) i råvareforholdet 42% biogasfiber og 58% halmpiller. I tørstofandel svarer det til 25,6% fra biogasfiber og 74,4% fra halmpiller. De to

biomasser blev blandet i det nævnte forhold vha. en cementblander, hvor der blev blandet partier à 11 kg biogas-fiber og 15 kg halmpiller. Tørstofindholdet i blandingen blev efter et døgn målt til 65,0%.



Biogas-fiber efter dobbeltskruepresning (t.v.) og under tørring (t.h.). (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).



Blanding af biogas-fiber og halmpiller umiddelbart efter opblandingen. (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).

Halmpiller: Der blev anvendt halmpiller fra SJS Pellets A/S, Løgumkloster. Halmpillerne er 8 mm i diameter og baseret på hvedehalm, og der er ikke anvendt bindemidler ved fremstilling af halmpillerne. Tørstofindholdet i pillerne var 90,3%. Halmpillerne blev anvendt både alene og i blanding med enten sogylle-fiber eller biogasfiber som nævnt ovenfor.



Halmpiller. (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).

Forbrændingsforsøgene

Forbrændingstestene er udført i en 30 kW Reka kedel med vandrerist (HKRST 30), da kedeltypen er sammenlignelig ved forbrændingstest af f.eks. flis og alternative biomasser i større kedler, ligesom dens lufttilførsel er repræsentativ for mange større anlæg. Anlægget er ikke godkendt til affaldsforbrænding, men benytter sig af tilsvarende teknologi.



REKA-kedel 30 kW set ude fra. (Foto: https://www.reka.com/media/product_images/P1010002.JPG).



REKA-kedel 30 kW indvendigt. Der er lavet tilpasninger af kedlens lufttilførslen for at sikre, at brændslet kan afbrændes og luften tilsættes det korrekte sted. (Foto: Anders Pødenphant, Teknologisk Institut).

Forbrændingsforsøgene er udført på en prøvestand hos Teknologisk Institut i Aarhus. Der er til forsøget bygget en speciel beholder til fremføring af de valgte substrater, da det eksisterende fødesystem ikke er bygget til brændsel af denne type. Se billede nedenfor med den nye beholder inde i kedlen. Se tabel 24 vedr. specifikationer for anvendt udstyr.



Special tilpasset beholder til substratet med 85 liters volumen. (Foto: Anders Pødenphant, Teknologisk Institut).



Beholder fyldt med halmpiller. (Foto: Anders Pødenphant, Teknologisk Institut).

For hver gødningsprøve er følgende målt med onlinemetoder:

- Effekt
- Røgtemperatur
- CO
- CO₂
- OGC
- NO_x
- Partikelemission (filtermetode, målt som gennemsnitlig værdi over 30 minutter)

TABEL 24. Oversigt over benyttet udstyr under forsøgene.

Rack A1			
Instrument	Type	Traceability	Instrument number
Data logger		HP 34970A	DANAK 200
PC	Dell	-	-
CO analyser	Sick Maihak Sidor	-	270-A-2429
CO/CO ₂ analyser	Sick Maihak Sidor	-	270-A-2431
FID analyser	M & A		94097
NO _x analyser	ECO Physics CLD	-	270-A-2427
Pressure gauge	Autotran 700	ELAB	270-A-2441
Heated hose/probe	M&C	-	270-A-2480
Heated hose/probe	M&C	-	270-A-2482
Ambient temperature sensor	Type K	ELAB	270-A-2484
Spangas, C ₃ H ₈	AGA	Swedac	135577
Test rig 4			
Instrument	Type	Traceability	Instrument number
Water flow meter	0-11 m ³ /h	DANAK 200	270-A-1760

Water temperature sensor	Pt100 (flow)	DANAK 200	270-A-1492
Water temperature sensor	Pt100 (return)	DANAK 200	270-A-1491
Gas meter	Elster BK-G2,5MT	DANAK 9	105806
Other Equipment			
Instrument	Type	Traceability	Instrument number
Adiabatic calorimeter	-	IVC, Kemi	-
Span gas, CO/CO2	AGA	Swedac	135573
Span gas, CO/CO2	AGA	Swedac	135574
Zero gas, N2	AGA	Swedac	135575
Span gas, NO/CO	AGA	Swedac	135576
Data collection programme	N.I. Labview	-	TI-DOP ver. 13.28.vi
Dust measuring equipment	Ströhlein	-	270-A-1330
Surface thermometer	Technoterm 5500	DANAK 200	270-A-976
Water gauge	ELAB	-	270-A-1759
Scale (dust)	Mettler XS 204	ELAB	Id.nr. 7084
Scale (humidity)	Mettler PC 440	ELAB	270-A-947
Scale (fuel)	Sauter 60 kg	ELAB	270-A-484
Temperature calibrator	Jofra 650 SE	ELAB	270-A-0912

Før hvert forsøg med en gødningstype er kedlen opstartet på træpiller med henblik på at sikre en optimal driftstemperatur på kedlen, når substratet fødes ind i kedlen. Når kedlens driftstemperatur var opnået, blev indføding af substratet igangsat. Når substratet var fuldt fremført, og alle træpillerne var afbrændt, blev kedlen tømt for aske ved at åbne døren og udskrabe asken fra opstarten med træpiller.



Udtagning af aske fra opstart på træpiller. (Foto: Morten Gottlieb Warming-Jespersen, Teknologisk Institut).

Efter opvarmning og indregulering blev de egentlige forbrændingstest i kedlen udført. Testene blev udført sekventielt for hvert substrat, og to forbrændingsperioder for hvert brændsel af hver 2-3 timer blev monitoreret. Efter 2-3 timer blev asken indsamlet og placeret i åbne beholdere, mens den kølede af. Efter afkøling blev askeprøven placeret i en lukket beholder. Fra den nedkølede prøve blev der efterfølgende udtaget en repræsentativ prøve til analyse.

Der blev udført 7 forbrændingsforsøg

- 1 forsøg med forbrænding af rene halmpiller (10% vand).
- 4 forsøg med forbrænding af ren husdyrgødning, enten kyllingemøg (28% vand), tørret bri-ketteret hestemøg (11 % vand), tørret sogyllefiber (33% vand) eller tørret biogas-fiber (43% vand).
- 2 forsøg med forbrænding af enten sogyllefiber eller biogas-fiber iblandet halmpiller til en samlet vandindhold på 31-35%.

Der er beregnet gennemsnitlige emissionsværdier for hvert forbrændingsforsøg med dobbeltbestemmelse fra de syv forskellige substrater, på nær målingerne med den rene fraktion af sogylle-fiber og biogas-fiber, da disse brændte så dårligt, at der kun er taget en aske prøve ud pr. målinger, som senere er neddelt til 2 repræsentative prøver.

Det er vurderet, at de replicerende sekvenser er sammenlignelige, om end der har været forskel på forbrændingstemperaturerne på grund af udfordringer med afbrænding af nogle af substraterne, som forværredes over tid.

Opholdstid og temperaturer i brændkammeret

I et forbrændingsanlæg er der krav om at opholdstid for røggassen skal være mere end 2 sekunder ved 850°C eller 0,2 sekunder ved 1.100°C. Årsagen til dette krav er at sikre, at røggas-

sens indhold af blandt andet PAH og andre uønskede stoffer er tilstrækkeligt omdannet til ufarlige stoffer. I dette projekt er fokus primært på askefraktionen og kun i mindre grad røggassens emissioner, hvorfor opholdstiden af røggassen i dette projekt er mindre væsentlig, om end det er en klar forudsætning for godkendelse af et forbrændingsanlæg og skal opnås i et sådant anlæg. I et godkendt forbrændingsanlæg er dette en selvfølge og noget, der løbende monitoreres. Røggassens opholdstid i den varmeste zone i forsøgskedlen er beregnet til mellem 0.5 sek. for røggassen ved 830°C og 0.6 sek. ved 611°C, som er henholdsvis højeste og laveste gennemsnitlige temperaturer under forsøgene. Der har i perioder været højere temperaturer end 850°C, men opholdstiden her har også været under 2 sek. Opholdstiden er således under det krav, der vil være i et forbrændingsanlæg. Det er dog samtidig uden betydning for askefraktionen i dette projekt og vurderes ikke at have betydning for projektets resultater.

Temperaturen i brændkammeret er i projektet monitoreret med føler indsat med ca. 30 cm til sidevægge og top af kedlens brændkammer og således placeret lige ude foran brændkammeret. Der er brugt et Type K element specielt til høje temperaturer. Da føleren er monteret i lågen, er der fald i temperaturen, når lågen åbnes for at udtage aske, som det ses på billedet nedenfor.



Billede af termofølerens installation gennem dør. (Foto: Morten Gottlieb Warming-Jespersen, Teknologisk Institut).

Brændslets opholdstid i brændkammeret vurderes at være omkring en time, og temperaturerne i brændslet (der ikke er målt) vurderes at være væsentligt over de 850°C, da der har været sintring og sammensmeltning af materiale, og da røggastemperaturen over brændslet har været i området omkring 750-850°C.

Analyse af udtaget aske

Analyserne er foretaget på Teknologisk Institut samt på AnalyTech Miljølaboratorium A/S. Analyserne foretaget i forsøget er udført i henhold til Miljøstyrelsens metodeblad 1 (<https://mst.dk/media/89932/Metodeblad%201%20141008.pdf>).

Der er i alt blevet udtaget 14 askeprøver fra kedlen, og de enkelte prøver er efterfølgende formålet med henblik på at kunne foretage analyserne og sikre, at partiklerne er mindre end 2 mm. Formalingen af foretaget på en Retsch P19 Knivmølle.



Retsch P19 Knivmølle. (Foto: Morten Gottlieb Warming-Jespersen, Teknologisk Institut).

Efterfølgende er der foretaget prøve-neddeling af prøverne på en rotationsneddeler med henblik på at sikre repræsentative prøver til videre analyse.



Fritsch Rotary Sample Divider laborette 2.7 (Foto: Helena Nielsen, Teknologisk Institut).

Efter neddeling blev en delprøve formalet til under 0,2 mm til analyserne hos Analytech Miljølaboratorium samt glødetab udført på Teknologisk Institut. Resten af analyserne udført på Teknologisk Institut blev gjort på materialet under 2 mm.

Teknologisk Institut har udført følgende analyser:

- Tørstof
- Glødetab
- pH
- Ledningsevne
- Askeindhold på råmaterialet

Hos AnalyTech Miljølaboratorium A/S er følgende analyser gennemført for alle askeprøver, hvor analyserapport kan findes i bilag 1:

- Tungmetaller (Hg, Pb, Ni, Cr, Cd, Cu og Zn)
- Sum af PAH (Σ Acenaphthen, Phenanthren, Fluoren, Fluoranthren, Pyren, Benz(b+j+k) fluoranthren, Benzo(a)pyren, Benz(ghi)perylene, Indeno(1,2,3-cd)pyren)
- Kalium (K)
- Totalfosfor (P)
- TOC

7.2 Resultater

Forbrændingsforsøg

De samlede resultater vedr. emissioner m.m. fra forbrændingsforsøgene er indsat nedenfor i tabel 25. Gennemgang af de enkelte målinger beskrives i de efterfølgende afsnit.

TABEL 25. Resultater vedr. emissioner m.m. fra forbrændingsforsøgene.

Brændselstype/prøvenummer		Måletid Timer	Effekt kW	Røgtab %	CO ₂ mg/m ³	Temperaturer			Emissioner ved 10% O ₂			Støv
						Røg °C	Brændkammer °C		CO	NO _x	OGC (C) mg/m ³	
						Middel	Middel	Maks.			Middel	
Kyllingemøg, økologisk	1.1	3,3	29,8	17,3	9	183	746	951	4.477	-	241	1.170
	1.2	2,7	25,2	19,4	8	183	682	956	6.788	-	748	1.477
	1.1 + 1.2	6,0	27,7	18,2	8	183	718	956	5.453	604*	456	1.324
Hestemøg, tørret og pelleteret	2.1	2,4	32,0	15,1	9	177	830	980	1.097	-	10	902
	2.2	2,5	34,9	15,2	10	196	815	927	688	-	7	950
	2.1 + 2.2	4,8	33,5	15,1	9	187	822	980	876	514*	8	926
Sogylle-fiber (Tørret)	3.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3.1 + 3.2	2,5	15,0	22,1	5	141	611	746	8.675	773*	960	-
Sogylle-fiber + Halmpiller	4.1	2,4	32,2	11,1	11	164	729	788	716	-	8	497
	4.2	2,4	31,6	11,6	12	175	711	774	507	-	< 6	511
Halmpiller	4.1 + 4.2	4,8	31,9	11,4	11	170	720	788	609	426*	7	504
Biogas-fiber (Tørret)	5.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5.1 + 5.2	5	27,0	17,4	8	177	694	871	2.084	721*	58	-
Biogas-fiber + Halmpiller	6.1	3,9	28,9	8,4	12	139	753	818	180	-	< 6	404
	6.2	2,1	29,8	9,0	13	149	794	835	217	-	< 6	443
Halmpiller	6.1 + 6.2	6,0	29,2	8,6	12	142	767	835	193	386*	< 6	424
Halmpiller	7.1	2,8	33,0	7,2	14	135	811	846	227	-	< 6	387
	7.2	3,2	33,5	7,5	14	139	817	839	196	-	< 6	486
	7.1 + 7.2	6	33,3	7,3	14	137	814	846	210	266*	< 6	437

Som det ses af tabel 25, har det for de rene fraktioner af sogyllefiber og biogasfiber ikke været muligt at tage delprøver af asken og støvprøver (pga. for høje emissioner) undervejs, da forbrændingen har været så ugunstig, at det undervejs er blevet vurderet, at det har været bedre at sikre den forsatte forbrænding og tilstrækkelig temperatur i brændslet. Derfor er der kun udtaget prøve til slut. For de resterende brændsler er der udtaget aske 2 gange.

		
Kyllingemøg	Hestemøg	Sogyllefibre og halmpiller
		
Biogasfibre og halmpiller	Halmpiller	

Billeder af primær (patronfilter) og backup(planfilter) filtre med udtagne støvprøver for de enkelte substrater. (Foto: Anders Pødenphant, Teknologisk Institut).

De udtagne støvprøver ses på ovenstående billede. Det har ikke været muligt at udtage støvprøver for de rene fraktioner af sogyllefiber og biogasfibre, da udstyret stoppede til under målingen, hvilket indikerer et ekstremt højt niveau af støv (mere end 1.500 mg/nm^3). I alle tilfælde har støvkonzentrationen været væsentligt over kravene til affaldsforbrændingsanlæg (10 mg/nm^3). Den højest registrerede støvprøve er observeret ved kyllingemøg på 1.477 mg/nm^3 . For biogasfiber og sogyllefiber iblandet halm har støvkonzentrationen været sammenlignelig med de rene halmpiller. Til sammenligning kan træpiller forbrændes i kedlen i et niveau under 40 mg/nm^3 uden partikelreduktionsudstyr. Den benyttede kedel har ikke partikelreduktionsudstyr; i et affaldsforbrændingsanlæg vil der typisk både være elektrostatisk filter og skrubbersystem til at håndtere partiklerne. Det er således et opmærksomhedspunkt at sikre, at røgrensning er tilgængeligt og tilstrækkelig til at sikre emissioner under grænseværdierne. Nedenfor er der indsat billeder af forbrændingssituationen for nogle af forbrændingsforsøgene.

	
Forbrændingen af hestemøg	Forbrænding af hestemøg
	
Aske og slagge fra Sogyllefibre	Forbrænding af sogyllefibre og halm

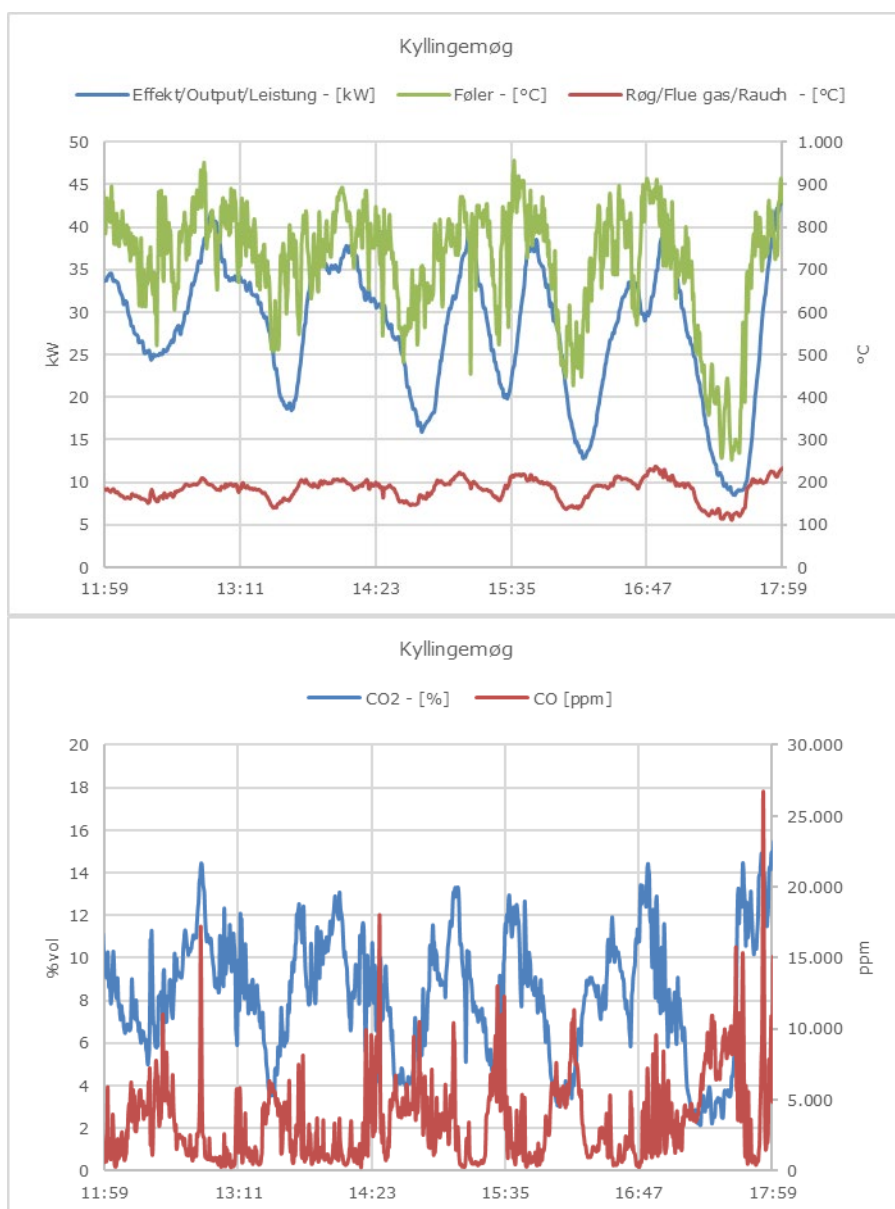
Billeder fra forbrændingen samt eksempler på aske og slagge fra forbrændingen.

Online målinger af effekt, temperatur og emissioner

Der er foretaget en række online målinger af effekt, temperatur i brændkammer og røggas samt emissioner af CO og NO_x fra kedlen under forsøgene med de enkelte brændsler. Disse er indsat som løbende værdier nedenfor for under de enkelte forsøg. Sammenlignet med tabel 25, er disse de målte værdier, før de er henført til en referencetilstand. Værdierne i graferne dækker over første og andet testinterval af det enkelte brændsel. Det vil kunne ses på de fleste grafer, at der er et stort fald i brændkammertemperaturen, svarende til åbning af kedlen og markering af skift mellem første og anden interval.

Kyllingemøg

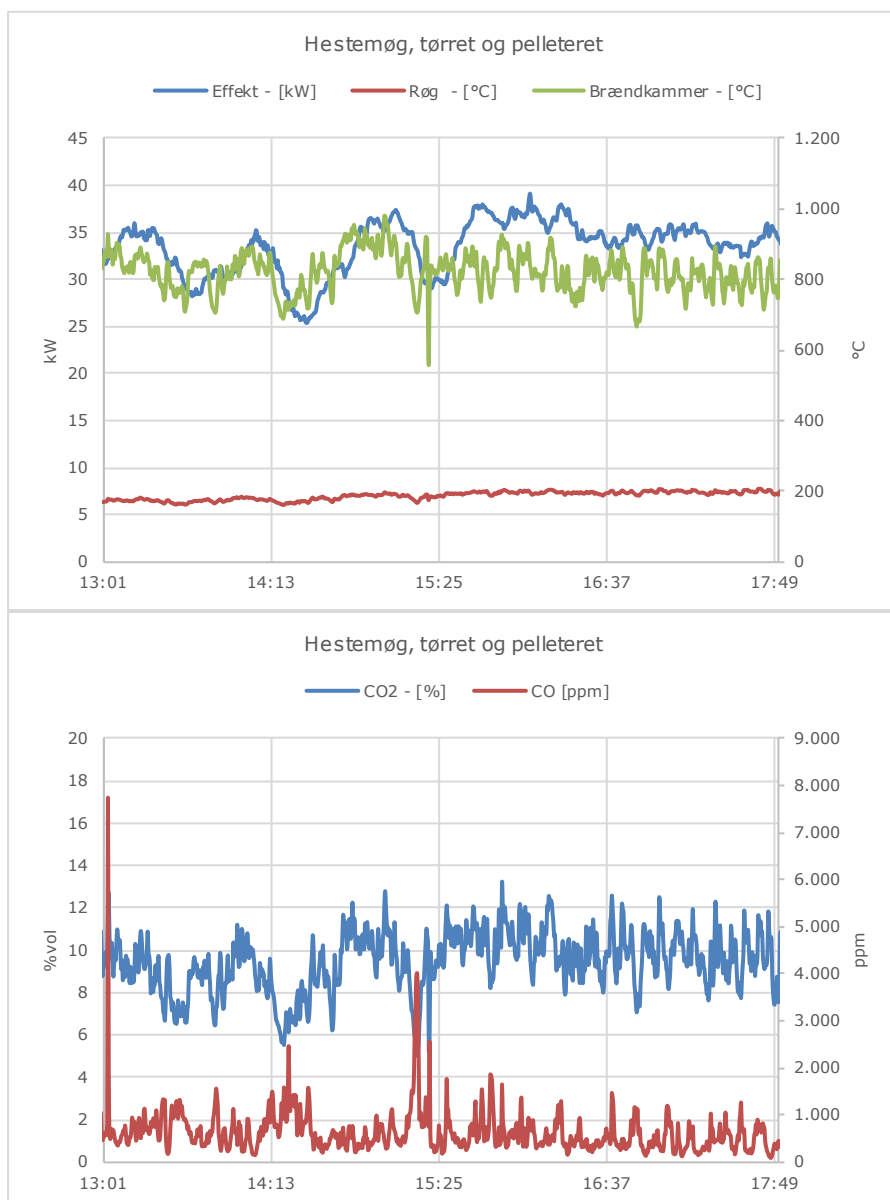
Kyllingemøget brændte generelt ustabil i både første og anden prøve. Se figur 2. Den primære årsag hertil skal findes i det høje askeindhold, der gør at asken danner et "låg" over brændslet; i takt med at vandreristen bevæger sig, falder låget ned, og forbrændingen starter voldsomt op igen. Forbrændingen viser, at der er en tilstrækkelig brændværdi og energidensitet i kyllingemøget til, at det kan forbrændes. Den gennemsnitlige forbrændingstemperatur var 746°C i første prøve, og 682°C i anden prøve med maksimumtemperaturer på 951°C og 956°C. Støvemissionerne var på 1.170 mg/nm³ og 1.477 mg/nm³ i henholdsvis første og anden prøve. CO-emissionen var sammenlignet med referencebrændslet halmpiller ca. en faktor 25 højere med værdier på 4.477 mg/nm³ og 6.788 mg/nm³. NO_x var ca. en faktor 2-3 højere end halmpillerne. OGC-værdierne var væsentligt over med referencebrændslet med værdier på 241 mg/nm³ og 748 mg/nm³. Det vurderes at kyllingemøget er et brændsel, der sætter krav til, at det benyttes til samfyring for at sikre optimal forbrænding.



FIGUR 2. Graf over forbrændingsforløb for rent kyllingemøg. Øverst effekt og temperaturer, nederst emissioner af CO₂ og CO.

Hestemøg, tørret og pelleteret

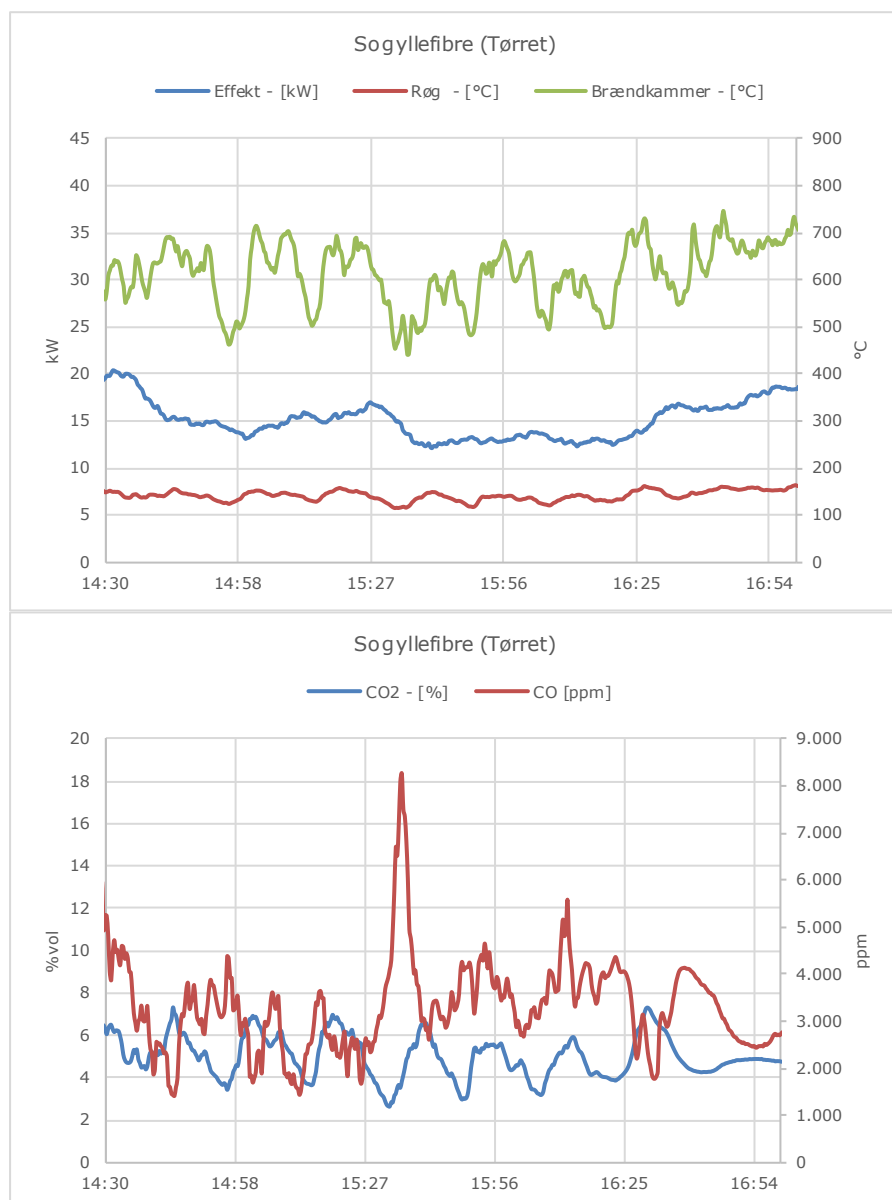
Hestemøget brændte stabilt både i første og anden prøve og havde en gennemsnitlig forbrændingstemperatur på 830°C i første prøve og 815 °C i anden prøve med maksimumtemperaturer på 980°C og 927°C. Se figur 3. Støvemissionerne var på 902 mg/nm³ og 950 mg/nm³ i henholdsvis første og anden prøve. CO-emissionen var sammenlignet med referencebrændslet halvpiller en faktor 4-5 gange højere med værdier på 1.097 mg/nm³ og 688 mg/nm³. NO_x var ca. en faktor 2 højere end halvpillerne. OGC-værdierne er i niveau med referencebrændslet. Generelt vurderes hestemøget at være et muligt brændsel til ren forbrænding, hvis det forbrændes i en kedel med partikelfiltre og DeNOx.



FIGUR 3. Graf over forbrændingsforløb for hestemøg, tørret og pelleteret. Øverst effekt og temperaturer, nederst emissioner af CO₂ og CO.

Sogyll-fiber, Tørret

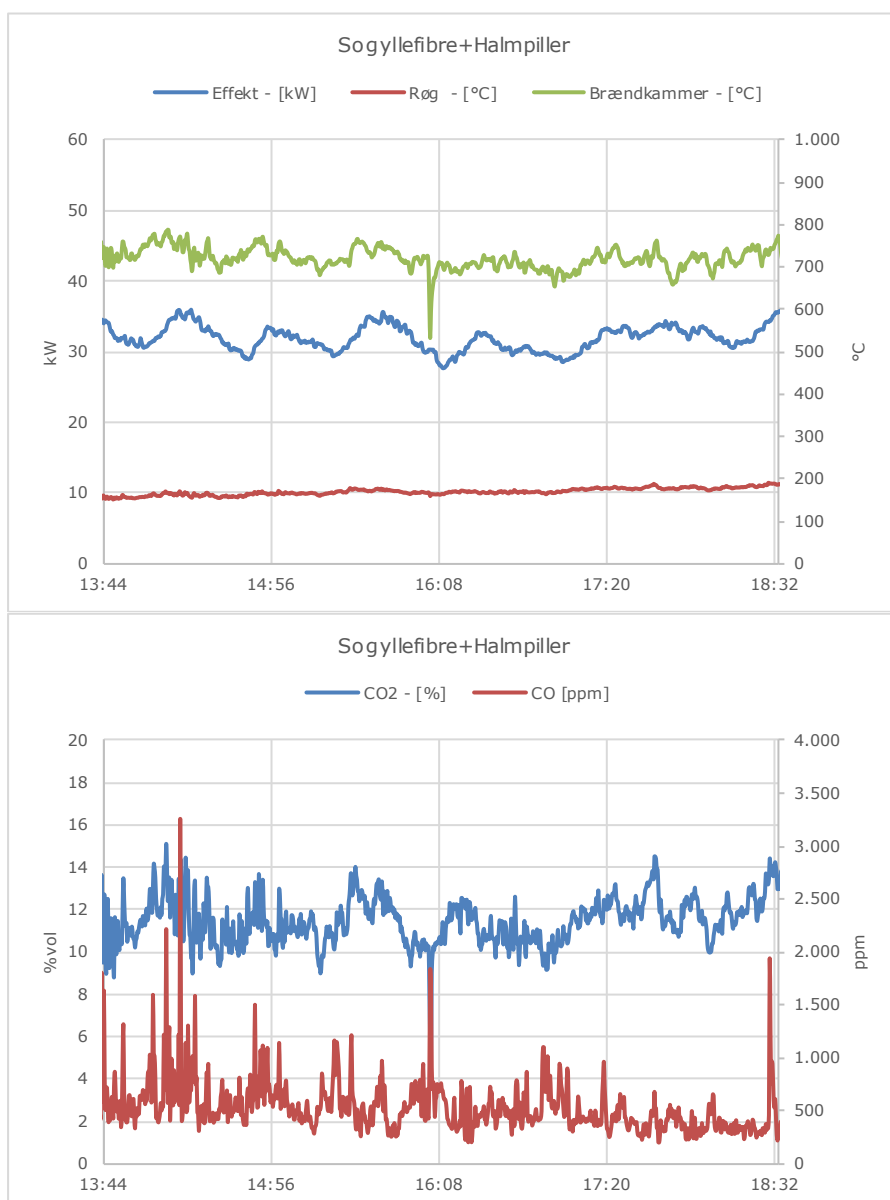
Den rene fraktion af sogylle-fiber brændte generelt ustabil i både første og anden prøve. Se figur 4. Den primære årsag hertil vurderes at være et højt askeindhold samt lav energitæthed. Som for kyllingemøget dannede asken et låg på brændslet, men i modsætning til kyllingemøget var der ikke tilstrækkelig energi i brændslet til at sikre forbrændingen. Det blev vurderet undervejs i forsøget, at der ikke skulle åbnes til brændkammeret for at sikre tilstrækkelig temperatur i brændslet. Derfor er der ikke udtaget delprøver af dette forbrændingsforsøg. Den gennemsnitlige forbrændingstemperatur var 611°C i med maksimumtemperaturer på 746°C. Støvemissionerne var ikke kvantificerbare med de anvendte metoder. CO-emissionen var sammenlignet med referencebrændslet halmpiller ca. en faktor 40 højere med værdier på 8.675 mg/nm³. NO_x var ca. en faktor 3-4 højere end halmpillerne. OGC-værdierne var væsentligt over med referencebrændslet med værdier på 960 mg/nm³. Det vurderes at sogylle-fiber skal samfyres, og det bør overvejes, hvor store mængder der tilføjes for at sikre optimal forbrænding.



FIGUR 4. Graf over forbrændingsforløb for tørret sogylle-fiber. Øverst effekt og temperaturer, nederst emissioner af CO₂ og CO.

Sogyllle-fiber og halmpiller

Sogylllefiber samfyrret med halmpiller brændte generelt stabilt i både første og anden prøve. Se figur 5. Den gennemsnitlige forbrændingstemperatur på var på 729°C i første prøve og 711°C i anden prøve med maksimumtemperaturer på 788°C og 774°C. Støvemissionerne var på 497 mg/nm³ og 511 mg/nm³ i henholdsvis første og anden prøve. CO-emissionen var sammenlignet med referencebrændslet ca. en faktor 3 højere med værdier på 716 mg/nm³ og 507 mg/nm³. NO_x emissionen var ca. en faktor 2 højere end referencebrændslet. OGC-værdierne var sammenlignelige med referencebrændslet. Samfyring med halmpiller sikrede en mere stabil forbrænding sammenlignet med forbrænding af den rene fraktion af sogyllefiber, dog viser forsøget, at det bør overvejes, hvilket brændsel der benyttes til samfyring for at sikre tilstrækkelige temperaturer. Halmen har resulteret i en stabil forbrænding, dog ved utilstrækkelige temperaturer. Det bør desuden overvejes, hvor store mængder af sogyllefiber der tilsættes ved samfyring.

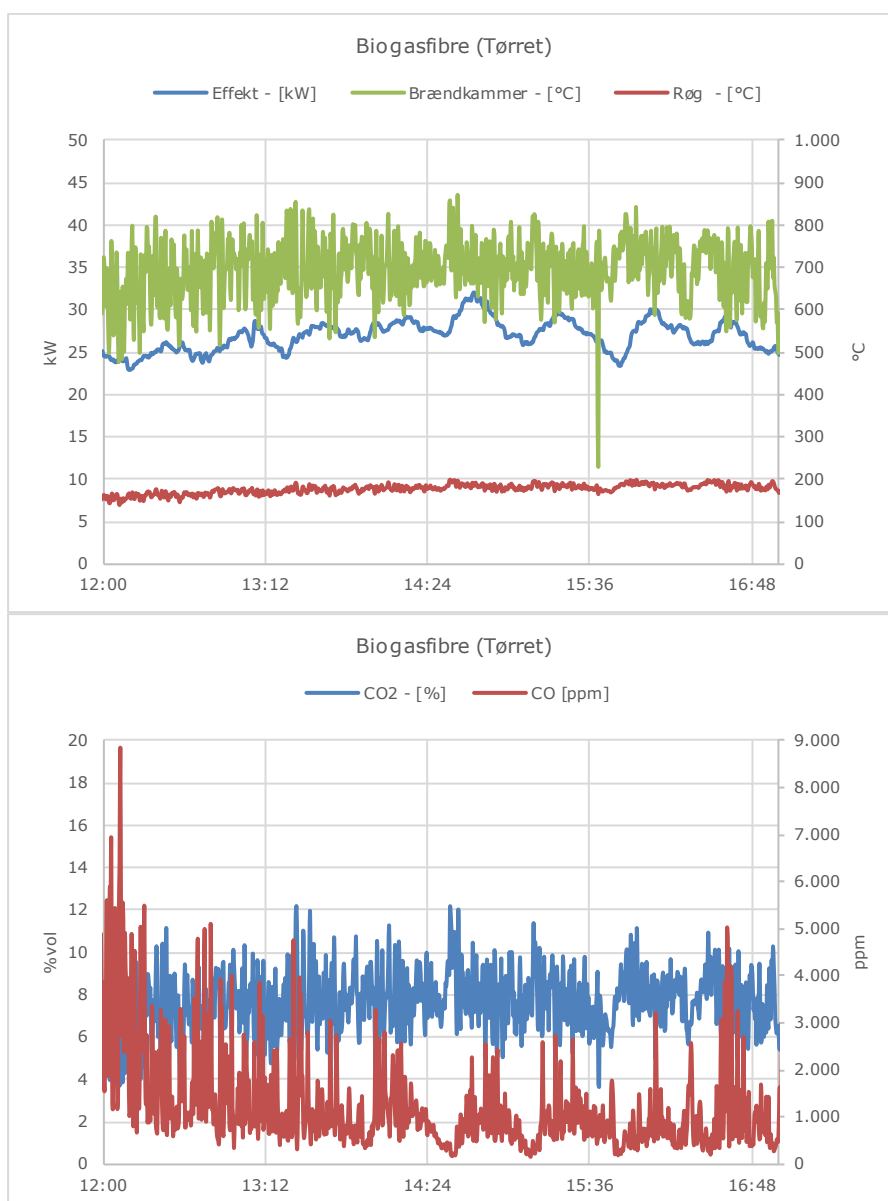


FIGUR 5. Graf over forbrændingsforløb for tørret sogylle-fiber og halmpiller. Øverst effekt og temperaturer, nederst emissioner af CO₂ og CO.

Biogas-fiber, tørret

Den rene fraktion af biogas-fiber brændte generelt ustabil i både første og anden prøve. Se figur 6. Den primære årsag hertil vurderes som for sogylle-fiber at være et højt askeindhold samt lav energitæthed. Dog var forbrændingen sammenlignet med sogylle-fiber bedre. Som for kyllingemøget dannede asken et låg på brændslet, men som for sogylle-fiber var der ikke tilstrækkelig energi i brændslet til at sikre forbrændingen. Det blev vurderet undervejs i forsøget, at der ikke skulle åbnes til brændkammeret for at sikre tilstrækkelig temperatur i brændslet. Derfor er der ikke udtaget delprøver af dette forbrændingsforsøg.

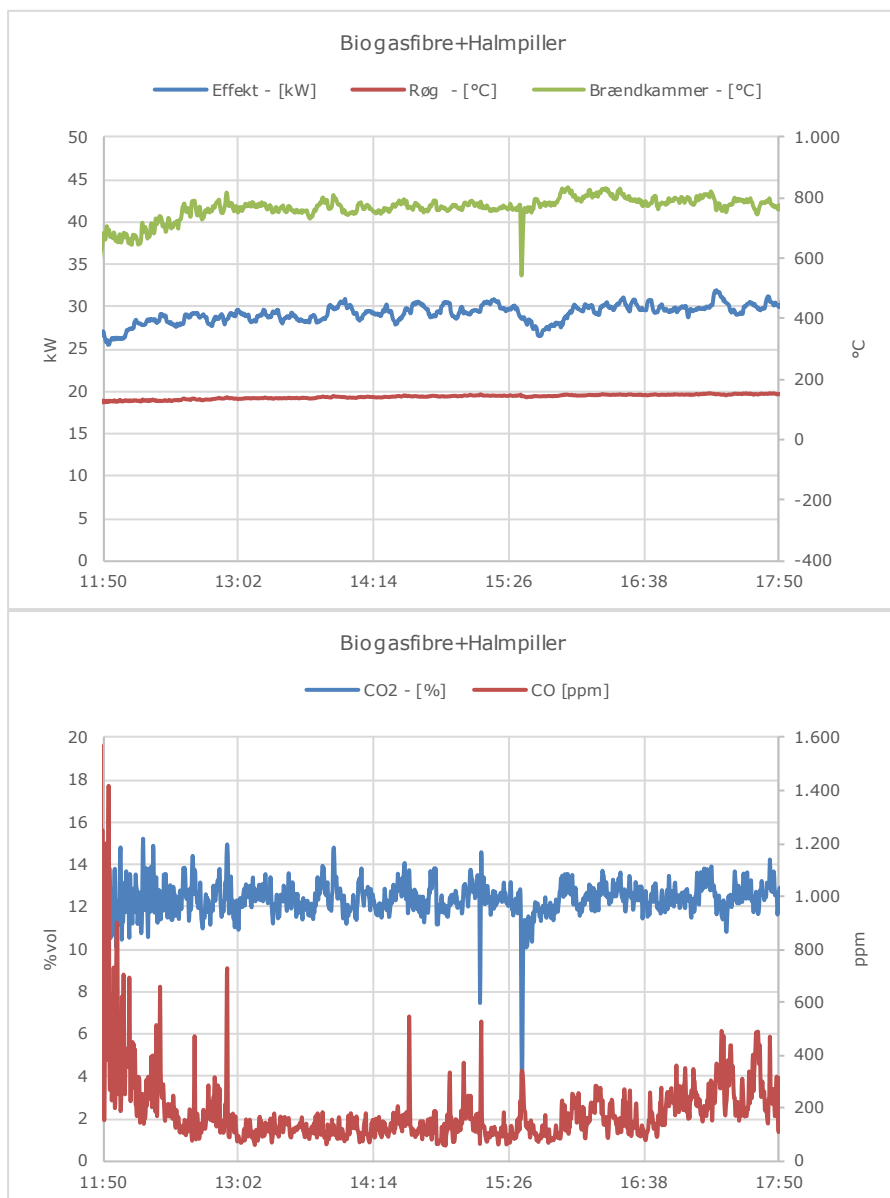
Den gennemsnitlig forbrændingstemperatur var 694°C med maksimumtemperaturer på 871°C. Støvemissionerne var ikke kvantificerbare med de anvendte metoder. CO-emissionen var sammenlignet med referencebrændslet halmpiller ca. en faktor 10 højere med værdier på 2084 mg/nm³. NO_x var ca. en faktor 3-4 højere end halmpillerne. OGC-værdierne var ca. en faktor 10 højere med værdier på 85 mg/nm³. Det vurderes, at biogas-fiber skal samfyres i begrænsede andele for at sikre optimal forbrænding. Det er dog et bedre brændsel end sogylle-fiber og vurderes at kunne samfyres i højere andele end sogyllefiber.



FIGUR 6. Graf over forbrændingsforløb for tørret biogas-fiber. Øverst effekt og temperaturer, nederst emissioner af CO₂ og CO.

Biogas-fiber og halmpiller

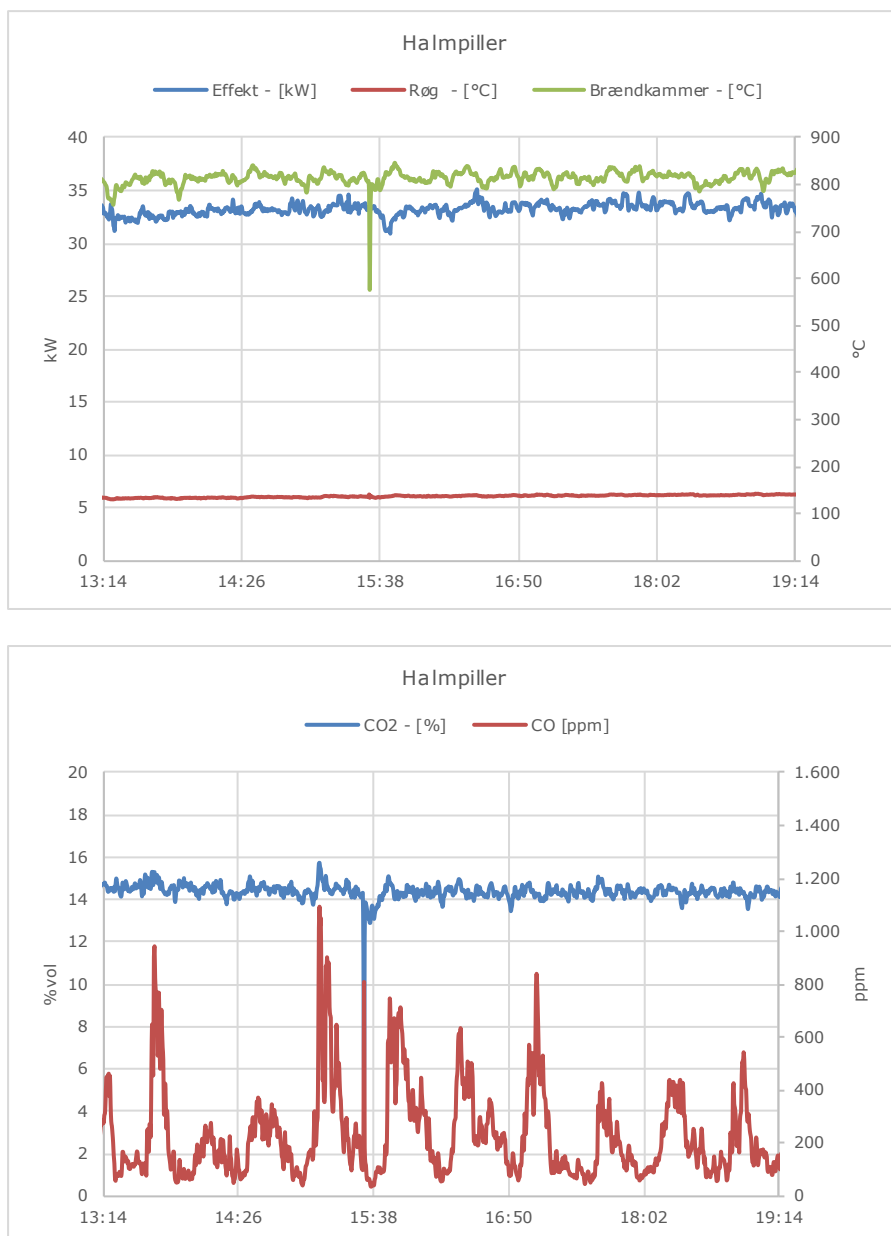
Biogasfiber samfyret med halmpiller brændte generelt stabilt i både første og anden prøve. Se figur 7. Den gennemsnitlige forbrændingstemperatur var på 753°C i første prøve og 794°C i anden prøve med maksimumtemperaturer på 818°C og 835°C. Støvemissionerne var på 404 mg/nm³ og 443 mg/nm³ i henholdsvis første og anden prøve. CO emissionen var sammenlignelig med referencebrændslet med værdier på 180 mg/nm³ og 217 mg/nm³. NO_x emissionen var ca. en faktor 2 højere end referencebrændslet. OGC-værdierne var sammenlignelige med referencebrændslet. Samfyring med halmpiller sikrede en mere stabil forbrænding sammenlignet med forbrænding af den rene fraktion af biogas-fiber, dog viser forsøget, at det bør overvejes hvilket brændsel, der benyttes til samfyring for at sikre tilstrækkelige temperaturer. Halmen har resulteret i en stabil forbrænding, dog ved utilstrækkelige temperaturer. Det bør desuden overvejes i hvor store mængder sogyllefiber tilsættes ved samfyring.



FIGUR 7. Graf over forbrændingsforløb for tørret biogasfiber og halmpiller. Øverst effekt og temperaturer, nederst emissioner af CO₂ og CO.

Halmpiller - referencebrændsel

Halmpillerne brændte stabilt både i første og anden prøve og havde en gennemsnitlig forbrændingstemperatur på 811°C i første prøve, og 817°C i anden prøve med maksimumtemperaturer på 894°C og 839°C. Se figur 8. Støvemissionerne var på 387 mg/nm³ og 486 mg/nm³ i henholdsvis første og anden prøve. CO-emissionen var på 227 mg/nm³ og 196 mg/nm³ NO_x var 266 mg/nm³. OGC-værdierne var <6 mg/nm³. Generelt vurderes det, at halm kan være et støttebrændsel til samfyring, men det bør samtidig overvejes, om det kan sikre tilstrækkelige temperaturer, eller der bør vælges et andet biobrændsel såsom træflis.



FIGUR 8. Graf over forbrændingsforløb for halmpiller. Øverst effekt og temperaturer, nederst emissioner af CO₂ og CO.

Askeanalyser

De analyserede askefraktioner ses på nedenstående billede. Der er tydelig farveforskel på askerne, hvilket kan henledes til indholdsstoffer samt mængden af uforbrændt materiale i asken.

Kyllingemøg 1.1	Kyllingemøg 1.2	Biogasfiber 5.1	Biogasfiber 5.2
			
Hestemøg 2.1	Hestemøg 2.2	Biogasfiber og halm 6.1	Biogasfiber og halm 6.2
			
Sogyllefiber 3.1	Sogyllefiber 3.2	Halmpiller 7.1	Halmpiller 7.2
			
Sogyllefiber og halm 4.1	Sogyllefiber og halm 4.2		
			

Askefraktioner formalet til <2 mm (Foto: Helena Nielsen, Teknologisk Institut).

De samlede resultater på askeprøverne er indsat nedenfor i tabel 26.

TABEL 26. Oversigt over analyseresultater foretaget på askefraktionerne. Desuden grænseværdier for indhold i halmaske jf. Bioaskebekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2019a) og for indhold i affald jf. Affald til jord-bekendtgørelsen (Retsinformation.dk, 2018).

Brændselstype	Tørstof		Glødetab	pH	Ledningsevne	P	K	Hg	Pb	Ni	Cr	Cd	Cu	Zn	PAH	TOC
	Prøve	%														
1. Kyllingemøg	1.1	99,9	1,9	11,9	1.681	94.500	108.000	<0,1	2,6	42	10	0,13	193	1160	<0,1	9.250
	1.2	100,0	1,5	11,7	1.322	96.200	103.000	<0,1	2,6	40	12	0,10	179	876	<0,1	6.080
	Gnsn.	99,9	1,7	11,8	1.502	95.350	105.500	<0,1	2,6	41	11	0,12	186	1018	<0,1	7.665
2. Hestemøg	2.1	100,1	1,8	12,4	1.875	26.800	153.000	<0,1	5,1	14	23	0,14	220	337	<0,1	4.410
	2.2	100,0	0,9	12,2	1.566	25.500	148.000	<0,1	5,7	16	26	0,12	235	328	<0,1	145
	Gnsn.	100,0	1,3	12,3	1.721	26.150	150.500	<0,1	5,4	15	25	0,13	228	333	<0,1	2.278
3. Sogylle-fiber	3.1	99,9	0,8	11,6	335	48.700	9.560	<0,1	3,1	17	41	0,10	101	362	<0,1	4.110
	3.2	99,9	0,8	11,7	369	50.900	10.300	<0,1	3,3	18	43	0,12	99	350	<0,1	4.130
	Gnsn.	99,9	0,8	11,7	352	49.800	9.930	<0,1	3,2	18	42	0,11	100	356	<0,1	4.120
4. Sogylle-fiber + halmpiller	4.1	99,9	2,0	12,0	1.111	21.900	119.000	<0,1	5,0	16	30	0,08	91	349	0,2	8.230
	4.2	99,6	4,8	12,0	1.231	22.000	112.000	<0,1	4,1	15	34	0,09	85	293	0,1	22.600
	Gnsn.	99,8	3,4	12,0	1.171	21.950	115.500	<0,1	4,6	16	32	0,09	88	321	0,2	15.415
5. Biogas-fiber	5.1	99,8	2,8	12,2	995	28.000	38.000	<0,1	2,6	24	48	0,23	85	342	<0,1	13.300
	5.2	99,9	1,1	12,2	751	29.300	35.900	<0,1	2,8	25	52	0,18	86	300	<0,1	4.780
	Gnsn.	99,8	1,9	12,2	873	28.650	36.950	<0,1	2,7	25	50	0,21	86	321	<0,1	9.040
6. Biogas-fiber + halmpiller	6.1	99,3	4,5	11,7	1.669	20.400	161.000	<0,1	3,9	14	29	0,15	71	284	0,3	16.600
	6.2	99,7	1,9	11,7	1.136	20.600	160.000	<0,1	6,0	15	32	0,09	76	269	0,4	6.970
	Gnsn.	99,5	3,2	11,7	1.403	20.500	160.500	<0,1	5,0	15	31	0,12	74	277	0,4	11.785
7. Halmpiller	7.1	99,7	5,0	11,7	1.194	11.600	189.000	<0,1	2,2	12	26	<0,02	49	100	0,1	31.900
	7.2	100,1	1,8	11,9	1.078	12.400	201.000	<0,1	2,2	11	28	<0,02	49	94	<0,1	4.930
	Gnsn.	99,9	3,4	11,8	1.136	12.000	195.000	<0,1	2,2	12	27	<0,02	49	97	0,1	18.415
Grænseværdi for halmaske jf. Bio- askebekendtgørelsen					2.800-3.600			0,8	120	60	100	5	12			
Grænseværdi for affald jf. Affald til jord-bekendtgørelsen								0,8	120	30	100	0,8	1.000	4.000		

Som det ses af tabel 26, er der generelt et større glødetab på askefraktion nr. 1 af brændslerne bortset fra i prøve nr. 4. sogylle-fiber + halmpiller, hvor det er omvendt med et større glødetab i askefraktion nr. 2. Glødetabet er til dels et udtryk for, hvor stor en del der er uforbrændt i asken, hvilket altså tyder på at den længere opholdstid for brændslet har resulteret i et mindre glødetab i askefraktion 2 end i 1. Der ses de samme tendenser i TOC-resultaterne, da de også giver et billede af mængden af uforbrændt materiale og forventes at følge glødetabet. Den rene sogylle-fiber har som den eneste ens glødetab og TOC-resultater i begge askeprøver. Det kan være grundet den ulmende forbrænding, som har skabt en mere jævn afbrænding, hvilket også kan være grunden til, at det er husdyrgødningen med det laveste glødetab. Der ses generelt et højere glødetab i substraterne indeholdende halm. Det kan forklares ved, at der i udgangspunktet er mere organisk materiale i de substrater med halm end for dem uden. TOC er også generelt lavere i de rene gødninger uden tilsætning af halm, hvor den rene halm har det højeste TOC-indhold.

Glødetabet er under 5% i alle substrater, som er maksimumkravet i Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen. TOC-resultaterne er generelt lavere end glødetabet, hvilket skyldes, at glødetabet også indeholder uorganisk materiale, der forsvinder under glødetabstesten, såsom flygtige salte, sulfidoxidation og uorganisk karbon.

Ledningsevnen har det samme mønster som glødetab og TOC. Ledningsevnen er i alle tilfælde under 2.800 mS/m på, hvilket betyder, at der må bruges en maksimal dosering ved udbringning. Der er ikke en væsentlig forskel på pH mellem asken fra biomasserne, der alle er basiske.

For alle askefraktionerne fra husdyrgødning gælder det, at der er et højere fosforindhold i substraterne sammenlignet med den rene halm. Specielt kyllingemøget har et højt fosforindhold, og dernæst kommer sogylle-fiber. Det betyder, at substraterne hurtigere vil kunne ramme fosforloftet jf. Husdyrgødningsbekendtgørelsen. Omvendt betyder det, at der skal transporteres og udbringes en mindre mængde pr. ha, hvilket potentielt reducerer omkostningerne. Tilsætningen af halm sænker fosforindholdet, og den rene biogas-fiber samt hestemøget ligger på et sammenligneligt niveau med de opblandede substrater, men der er stadig ca. dobbelt så meget fosfor i dem i forhold til den rene halm.

For alle askefraktionerne gælder det, at der er et lavere kaliumindhold i substraterne sammenlignet med halmen. Specielt den rene sogylle-fiber har et lavt kaliumindhold og dernæst den rene biogas-fiber. Tilsætningen af halm øger kaliumindholdet, hvilket kan være grunden til, at kaliumindholdet i den rene sogylle-fiber og biogas-fiber ligger lavt, da de naturligt ikke har særlige meget halm iblandet, sammenlignet med det rene kyllingemøg og hestemøget.

Tungmetallerne i alle askefraktionerne fra substraterne ligger under kravværdierne i Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen, men de er alle sammen højere end den rene halm, bortset fra krom i kyllingemøget, der er lavere, samt kviksølv som ligger under detektionsgrænsen for alle gødningstyperne. Kyllingemøget har dog et væsentlig højere indhold af nikkel og zink sammenlignet med de andre substrater. Cadmiumindholdet ligger lavt og vil ikke udgøre et problem i forhold til grænseværdien på 0,8 g pr. ha pr. år. Analyseresultatet viser desuden, at indholdet af kobber og zink i askeprøverne af sogylle-fiber er lavere end i de studier litteraturstudiet har fundet.

PAH i alle aske prøver har vist sig at være under grænseværdien på 12 mg pr. kg tørstof i Bioaskebekendtgørelsen. Den højeste værdi målt er for biogasfiber med halmpiller, hvor værdien er målt til 0,4 mg pr. kg tørstof. De resterende værdier er enten ved eller under detektionsgrænsen for analysemetoden.

7.3 Konklusion fra forbrændingsforsøget

De målte emissioner viser, at samfyring og røgrensning er nødvendig i forbrændingen af alle substrater på nær for tørret og pelleteret hestemøg, som viser et potentiale til at kunne forbrændes direkte under forudsætning af tilstedeværelse reduktionssystemer til NO_x og partikler. Den maksimale emission af NO_x og støv på hhv. 200 og 10 mg pr. m³ i Affaldsforbrændingsbekendtgørelsens er således overskredet for alle substrater, hvilket betyder, at der bør være DeNOX og partikelfilter på anlæg, som afbrænder disse produkter.

Generelt har det været vanskeligt at måle stabilt høje temperaturer i brændkammeret, men for enkelte brændsler har der været temperaturer over de 850 °C i perioder. Det gælder for hestemøg, biogas-fiber med halmpiller samt kyllingemøg, hvor temperaturen har været tæt på eller over temperaturkravet men middeltemperaturen har været under 850°C. I alle tilfælde er det dog vurderet, at temperaturen i brændslet på risten har været væsentligt over 850°C. Grunden til de lavere temperaturer er der en række årsager til. Først har placering af temperaturføleren en betydning; placeringen har betydet, at en del af primærluften (som ikke er forvarmet) passerer op forbi føleren og i praksis køler føleren en lille smule. Dernæst har det især for de rene fraktioner (biogas-fiber og sogylle-fiber) været et svært brændsel at afbrænde rent, hvilket skyldes en kombination af densitet, brændværdi og store askeindhold (se tabel 23) i brændslet. Forsøgene har desuden vist, at et støttebrændsel bør bruges, på nær for tørret og pelleteret hestemøg. For de andre substrater bør det overvejes hvilket støttebrændsel man vælger. Det kunne eksempelvis være træflis, som kan sikre tilstrækkeligt høje temperaturer.

Det vurderes, på trods af at forbrændingstemperaturerne (i røggassen) for brændslerne har været lavere end de 850°C som kræves i affaldsforbrændingsanlæg, at der er opnået en tilstrækkelig forbrænding af substraterne til at sikre et repræsentativt askeprodukt, som efterfølgende har kunnet analyseres. Det vurderes også, at når asken, som dette forsøg viser, kan benyttes på trods af en lavere temperatur, så vil dette også være gældende i et faktisk anlæg godkendt til affaldsforbrænding. Emissionerne ved forbrændingsforsøgene har vist, at i alle tilfælde har målingerne af NO_x og støv været over grænseværdien i Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen. Det er således nødvendigt at have tiltag til reduktion af disse på anlæggene, som skal afbrænde substraterne. CO og OGC vurderes til at kunne reduceres ved at optimere forbrændingen og sikre tilstrækkelig temperatur og opholdstid for røggassen.

Projektet har vist, at de analyserede askefraktioner fra substraterne i alle tilfælde overholder de krav, som er opstillet i Bioaskebekendtgørelsen og Affald til jord-bekendtgørelsen. Analyserne har også vist, at der er et højt næringsindhold af fosfor og kalium i asken. Der skal derfor henledes opmærksomhed på, hvor store mængder af asken fra substraterne, der kan udledes før fosforloftet på 30-39 kg fosfor pr. ha pr. år opnås.

8. Sammenfattende konklusioner og anbefalinger

Samlet vurdering af viden om indholdet af stoffer i aske for forbrænding af husdyrgødning

På basis af litteraturstudiet og de gennemførte forbrændingsforsøg kan det konkluderes, at der er et vist datagrundlag for at vurdere indholdet af stoffer i aske fra forbrænding af husdyrgødning, men at der ikke er et stærkt datagrundlag for generelle konklusioner. Der er flest tilgængelige data for fiberfraktion af svinegylle og afgasset gylle, mens der for visse andre gødnings typer kun er meget få observationer. For en del undersøgelser inkl. forbrændingsforsøgene i dette projekt er der tale om kun ét parti husdyrgødning pr. gødningstype, hvorfor der ikke opnås viden om variation indenfor en gødningstype, f.eks. mellem forskellige bedrifter med forskellig fodringspraksis m.m. Ligeledes kan ændring i fodringskvalitet og fodringspraksis m.m. over tid evt. bidrage til variation mellem ældre og nyere undersøgelser. Tilsammen giver de fundne data dog et indtryk af generelle niveauer og variation i indholdet af en del stoffer i aske.

Vurdering i forhold til Bioaskebekendtgørelsen

Aske fra forbrænding af husdyrgødning har generelt et vist indhold af de tungmetaller, der angives i Bioaskebekendtgørelsen, nemlig cadmium, krom, kviksølv, nikkel og bly. Generelt er indholdet af disse tungmetaller dog under eller væsentligt under bekendtgørelsens grænseværdier. En væsentlig undtagelse fra dette er indholdet af især cadmium og kviksølv i flyveaske, hvilket skyldes en opkoncentrering af visse tungmetaller i flyveaske. Hvis der er tale om bundaske eller den samlede askefraktion fra forbrænding af husdyrgødning, synes der generelt ikke at være problemer med at overholde Bioaskebekendtgørelsens grænseværdier for tungmetaller i halmaske og dermed heller ikke for træaske. Hvis der anvendes træflis eller halm som støttebrændsel ved forbrænding af husdyrgødning, forventes der heller ikke at være generelle problemer med overskridelse af grænseværdierne.

Hvis bundaske eller samlet askefraktion fra husdyrgødning udbringes i en mængde svarende til 30 kg fosfor pr. ha pr. år, hvilket udgør fosforloftet i en del områder, synes mængden af udbragt cadmium i de fleste tilfælde at holde sig under Bioaskebekendtgørelsens grænseværdi på 0,8 g pr. ha pr. planperiode, men overskridelse formodes også at kunne forekomme. Dette kan især være relevant, hvis der indenfor en bedrift udbringes større fosformængder på visse marker og mindre fosformængder på andre, hvilket lovgivningen giver mulighed for, når blot fosforloftet samlet set overholdes på bedriften.

Der er kun relativt få data vedr. emission af CO og især indholdet af PAH fra forbrænding af husdyrgødning. De tilgængelige data for CO-emission holder sig generelt under grænseværdien for forbrænding af træflis og i alle tilfælde under grænseværdien for forbrænding af halm. PAH-indholdet i aske fra forbrændingsforsøgene i dette projekt er langt under grænseværdien.

Fra et miljømæssigt perspektiv synes det oplagt at anvende samme grænseværdier for aske fra forbrænding af halm, træ og husdyrgødning. Ud fra de fundne data synes aske fra forbrænding af husdyrgødning i overvejende grad at overholde disse grænseværdier.

Andre relevante stoffer i aske fra forbrænding af husdyrgødning

Udover de stoffer, der er nævnt i Bioaskebekendtgørelsen, er der også indsamlet viden om andre relevante stoffer i aske fra husdyrgødning. For tungmetallerne kobber og zink foreligger der en del data, og indholdet af disse er generelt højest i aske fra forbrænding af gødning fra svin. I Affald til jord-bekendtgørelsen er der angivet grænseværdier for kobber og zink på tørstofbasis, og disse grænseværdier er i de fleste tilfælde overskredet for aske fra forbrænding af svinegylle, dog ikke i forsøget gennemført i dette projekt. Det høje indhold af kobber og zink formodes at være knyttet til brugen af kobber og zink i foder til svin, og denne praksis formodes at kunne ændre sig fremover, hvilket vil kunne reducere indholdet af kobber og zink i aske fra svinegylle. Ligesom for den udbragte mængde af cadmium med aske vil mængden af udbragt kobber og zink givetvis også blive begrænset af fosformængden i asken, og det er relevant at vurdere den udbragte mængde kobber og zink ved udbringning af den maksimale mængde fosfor pr. ha. Ved forbrænding af husdyrgødning og udbringning af aske på landbrugsjord vil der samlet set ikke udbringes større mængder tungmetal end ved udbringning af husdyrgødningen direkte på marken. Forbrændingen vil til gengæld give en mulighed for at få tungmetaller ud af kredsløb ved at deponere eller forarbejde flyveasken.

Der synes kun at være meget lidt viden om andre miljøfremmede indholdsstoffer i aske fra forbrænding af husdyrgødning, herunder patogener, antibiotikarester, hormonlignende forbindelser m.m. Generelt forventes det dog, at sådanne stoffer i husdyrgødningen ved forbrænding vil blive omdannet til harmløse forbindelser. Under forbrænding kan der dog også dannes uønskede stoffer som dioxin, men der er ikke fundet undersøgelser af udledning af dioxin ved forbrænding af husdyrgødning.

Ved forbrænding kan der i varierende omfang dannes NO_x , især ved forbrænding af biomasse med højt kvælstofindhold. Målinger af NO_x -emission ved forbrænding af husdyrgødning viser, at emissionen i en hel del tilfælde overskrider grænseværdien, som Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen angiver for anlæg, der forbrænder affald (Retsinformation.dk, 2017). Emission af NO_x bør derfor være et opmærksomhedspunkt ved forbrænding af husdyrgødning. Emission af støv fra forbrænding af husdyrgødning synes ligeledes at kunne være et kritisk punkt, der skal håndteres.

Mulige fordele og udfordringer ved forbrænding af husdyrgødning

Forbrænding af husdyrgødning kan give mulighed for at udnytte energiindholdet i gødningen samt at opkoncentrere næringsstoffer i en askefraktion. Dog mistes stort set alt kvælstof i gødningen ved forbrændingen, ligesom der forbrændes kulstof, som potentielt kunne bidrage til jordens kulstofpulje. Energiudnyttelsen vil i høj grad afhænge af tørstofindhold, askeindhold og brændværdi m.m. i husdyrgødningen, og det vurderes, at der for de fleste gødningstyper vil være behov for enten tørring eller iblanding af støttebrændsel for at sikre en tilstrækkeligt god forbrænding. Valg af type af støttebrændsel eller evt. tørring vil bl.a. afhænge af forbrændingsanlæg og samlet økonomi. Anvendelse af støttebrændsel vil medføre håndtering af flere brændselstyper, hvilket kan være en udfordring, men samtidig kan støttebrændsel være med til at sikre en god forbrænding og reduktion i emissioner med røggassen.

Opkoncentrering af næringsstoffer i aske ved forbrænding af husdyrgødning vil kunne give landbrugsmæssige fordele, da det gør det realistisk at transportere næringsstoffer over betydeligt større afstande og dermed udnyttelse i områder med større næringsstofbehov. Tilgængeligheden af især fosfor i aske kan dog være nedsat, hvorfor det kan være relevant med en forarbejdning af asken og evt. pelletering af hensyn til udbringning. Tilgængeligheden af fosfor vil dog være acceptabel til erstatningsgødskning, hvor det er tilstrækkeligt, at fosforen bliver tilgængelig over en årrække.

Yderligere viden der mangler at blive afdækket

Følgende forhold vedr. aske fra forbrænding af husdyrgødning foreslås nærmere belyst:

- Det er ønskeligt med et større datagrundlag vedr. indholdet af tungmetaller i aske og askefraktioner med den nuværende praksis for fodring m.m., især for indholdet af kobber og zink i gødning fra svin. Endvidere er det ønskeligt med data fra et større antal bedrifter inden for hver husdyrart for at belyse variationen.
- Fremtidige undersøgelser bør analysere indholdet af tungmetaller både i husdyrgødningen før forbrænding samt i askefraktionerne efter forbrænding for at kunne vurdere massebalancen for tungmetaller under forbrænding.
- Det bør overvejes, om Bioaskebekendtgørelsens grænseværdier for indholdet af tungmetaller i aske kan og bør relateres til fosforindholdet i asken.
- NO_x-emissionen fra forbrænding af husdyrgødning bør belyses nærmere og bl.a. sættes i forhold til typer af husdyrgødning og indhold af kvælstof i gødningen.
- Tilgængeligheden af fosfor i aske bør belyses nærmere, især fosforgødningsvirkningen i første vækstsæson efter udbringning. Ligeledes bør mulighederne for forarbejdning og formulering af gødningsprodukter i f.eks. pelleteret form undersøges.
- Behovet for støttebrændsel og effekten af forskellige typer og andele af støttebrændsel på forbrænding af husdyrgødning bør belyses nærmere.

9. Referencer

- Aguirre-Villegas, H.A., Larson, R.A., Sharara, M.A. 2019. Anaerobic digestion, solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission. *Science of The Total Environment*, **696**, 134059.
- Arbejdsgruppen. 2005. Rapport fra Arbejdsgruppen om afbrænding af fraktioner af husdyrgødning. 125 s.
- Awasthi, M.K., Sarsaiya, S., Wainaina, S., Rajendran, K., Kumar, S., Quan, W., Duan, Y., Awasthi, S.K., Chen, H., Pandey, A., Zhang, Z., Jain, A., Taherzadeh, M.J. 2019. A critical review of organic manure biorefinery models toward sustainable circular bioeconomy: Technological challenges, advancements, innovations, and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **111**, 115-131.
- Awiszus, S., Meissner, K., Reyer, S., Müller, J. 2018. Ammonia and methane emissions during drying of dewatered biogas digestate in a two-belt conveyor dryer. *Bioresource Technology*, **247**, 419-425.
- Baggesen, D.L. 2005. Vurdering af de veterinære risici ved afbrænding af den faste fraktion efter gylleseparering. in: *Rapport fra Arbejdsgruppen om afbrænding af fraktioner af husdyrgødning*, (Ed.) A.o.a.f.a. husdyrgødning, pp. 101-103.
- Bak, J.L., Jensen, J., Larsen, M.M. 2015. Belysning af kobber og zinkindholdet i jord. Indhold og udvikling i kvadratnettet og måling på udvalgte brugstyper. Aarhus Universitet, Institut for Bioscience.
- Bak, J.L., Larsen, M.M., Jensen, J. 2019. Case-studie af husdyrbrug med fokus på zink-omsætningen
- Aarhus Universitet, Institut for Bioscience.
- Birkmose, T. 2017. Nye fosforregler i husdyrgødningsbekendtgørelsen. Regelinfo, Landbrugsinfo 6/7 2017., SEGES. Landbrugsinfo.
- Birkmose, T., Hjort-Gregersen, K., Hinge, J., Hørfarter, R. 2015. Kortlægning af hensigtsmæssig lokalisering af nye biogasanlæg i Danmark. - Udpegning af områder med særlige muligheder for biogasanlæg. Rapport udarbejdet for Biogasrejseholdet, Erhvervsstyrelsen. December 2015. SEGES, AgroTech.
- Birkmose, T., Stougaard, K., Holst, T., Jensen, H.B., Nielsen, B.S. 2019. Fosforregulering - er biogasanlæg en løsning eller udfordring? Landbrug & Fødevarer, Foreningen Biogasbranchen, SEGES.
- Birkmose, T., Zinck, A.M. 2008. Status på afbrænding af husdyrgødning i Danmark - juni 2008. *Notat. Dansk Landbrugsrådgivning.*, 26 s.
- Boy, V., Liu, X., Chamaa, M.-A., Lemée, Y., Sabourin, C., Lendormi, T., Lanoisellé, J.-L. 2019. Air impingement drying of digestate: Experimental and modelling study. *Chemical Engineering Research and Design*, **146**, 436-448.
- Christel, W., Bruun, S., Magid, J., Jensen, L.S. 2014. Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment. *Bioresource Technology*, **169**, 543-551.
- Cocolo, G., Hjorth, M., Zarebska, A., Provolo, G. 2016. Effect of acidification on solid-liquid separation of pig slurry. *Biosystems Engineering*, **143**, 20-27.
- EUR-Lex. 2009. EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS FORORDNING (EF) nr. 1069/2009 af 21. oktober 2009 om sundhedsbestemmelser for animalske biprodukter og afledte produkter, som ikke er bestemt til konsum, og om ophævelse af forordning (EF) nr. 1774/2002 (forordningen om animalske biprodukter), (Ed.) EU-Kommisionen, Vol. L 300/1, 14.11.2009, Den Europæiske Unions Tidende. Bruxelles, pp. L 300/1-300/33.
- EUR-Lex. 2011. Kommissionens forordning (EU) 142/2011 af 25. februar 2011 om gennemførelse af Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EF) nr. 1069/2009 om sundhedsbestemmelser for animalske biprodukter og afledte produkter, som ikke er bestemt til konsum, og om gennemførelse af Rådets direktiv 97/78/EF for så vidt angår visse prøver og genstande, der er fritaget for veterinærkontrol ved grænsen

- som omhandlet i samme direktiv., (Ed.) EU-Kommisionen, Vol. L 54/1, 26.2.2011, Den Europæiske Unions Tidende. Bruxelles, pp. L 54/1-54/254.
- EUR-Lex. 2017. Kommissionens forordning (EU) 2017/1262 af 12. juli 2017 om ændring af forordning (EU) nr. 142/2011 for så vidt angår brugen af husdyrgødning som brændsel i brændingsanlæg (EØS-relevant tekst), (Ed.) EU-Kommisionen, Vol. L 182/34, 13.7.2017, Den Europæiske Unions Tidende. Bruxelles, pp. L182/34-36.
- Green, D. 2008. Rose Energy: Air Emissions. Engreen Environmental Consultants Ltd.
- Hadin, Å., Eriksson, O. 2016. Horse manure as feedstock for anaerobic digestion. *Waste Management*, **56**, 506-518.
- Hadin, Å., Eriksson, O., Hillman, K. 2016. A review of potential critical factors in horse keeping for anaerobic digestion of horse manure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **65**, 432-442.
- Hansen, A.B., Vikelsø, J., Avniskjold, J., Johansen, E. 2004. Dioxin i bioaske. Dioxinmåleprogram 2001-2003. Viden om kilder og emissioner.
- Hansen, T.H. 2004. Separation og genanvendelse af aske fra biobrændselsanlæg.
- Hjorth, M., Christensen, K.V., Christensen, M.L., Sommer, S.G.J.A.S.D. 2010. Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. **30**(1), 153-180.
- Huang, Y., Dong, H., Shang, B., Xin, H., Zhu, Z. 2011. Characterization of animal manure and cornstalk ashes as affected by incineration temperature. *Applied Energy*, **88**(3), 947-952.
- Jensen, J., Larsen, M.M., Bak, J. 2016. National monitoring study in Denmark finds increased and critical levels of copper and zinc in arable soils fertilized with pig slurry. *Environmental Pollution*, **214**, 334-340.
- Jensen, L.S. 2013. Animal manure residue upgrading and nutrient recovery in biofertilisers. in: *Animal manure recycling: treatment and management*, (Eds.) S.G. Sommer, M.L. Christensen, T. Schmidt, L.S. Jensen, John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK, pp. 271-294.
- Jeswani, H.K., Whiting, A., Martin, A., Azapagic, A. 2019. Environmental and economic sustainability of poultry litter gasification for electricity and heat generation. *Waste Management*, **95**, 182-191.
- Junga, R., Knauer, W., Niemiec, P., Tańczuk, M. 2017. Experimental tests of co-combustion of laying hens manure with coal by using thermogravimetric analysis. *Renewable Energy*, **111**, 245-255.
- Jørgensen, K., Jensen, L.S. 2009. Chemical and biochemical variation in animal manure solids separated using different commercial separation technologies. *Bioresource Technology*, **100**(12), 3088-3096.
- Katsaros, G., Shankar Pandey, D., Horvat, A., Tassou, S. 2019. Low temperature gasification of poultry litter in a lab-scale fluidized reactor. *Energy Procedia*, **161**, 57-65.
- Komiyama, T., Kobayashi, A., Yahagi, M.J.J.o.M.C., Management, W. 2013. The chemical characteristics of ashes from cattle, swine and poultry manure. **15**(1), 106-110.
- Kratzeisen, M., Starcevic, N., Martinov, M., Maurer, C., Müller, J. 2010. Applicability of biogas digestate as solid fuel. *Fuel*, **89**(9), 2544-2548.
- Kristensen, E.F., Kristensen, J.K., Sørensen, P., Hansen, M.N. 2009. Forbrænding af separeret husdyrgødning i mindre fyringsanlæg. *Grøn Viden, DJF Husdyrbrug*, Nr. **50**, juni 2009, 8 s.
- Kuligowski, K., Poulsen, T.G., Rubæk, G.H., Sørensen, P. 2010. Plant-availability to barley of phosphorus in ash from thermally treated animal manure in comparison to other manure based materials and commercial fertilizer. *European Journal of Agronomy*, **33**(4), 293-303.
- Li, X., Rubæk, G.H., Sørensen, P. 2016. High plant availability of phosphorus and low availability of cadmium in four biomass combustion ashes. *Science of The Total Environment*, **557-558**, 851-860.
- Liu, Z., Carroll, Z.S., Long, S.C., Gunasekaran, S., Runge, T. 2016. Use of cationic polymers to reduce pathogen levels during dairy manure separation. *Journal of Environmental Management*, **166**, 260-266.
- Liu, Z., Carroll, Z.S., Long, S.C., Roa-Espinosa, A., Runge, T. 2017. Centrifuge separation effect on bacterial indicator reduction in dairy manure. *Journal of Environmental Management*, **191**, 268-274.

- Lund, P., Hellwing, A.L.F., Børsting, C.F. 2019. Normtal for husdyrgødning – 2019. Gældende fra 1. august 2019. Notat fra Aarhus Universitet, Institut for Husdyrvidenskab.
- Lundgren, J., Pettersson, E. 2009. Combustion of horse manure for heat production. *Bioresource Technology*, **100**(12), 3121-3126.
- Mikkelsen, K.A., Bahrndorff, S. 2009. Afbrænding af fjerkrægødning. *Dansk Fjerkræ*, **9**, 398-401.
- Miljøstyrelsen. 2011. Afbrænding af gødning. Teknologiuudredning. *Miljøstyrelsen, Miljøministeriet. Teknologiuudredning*, **15/3 2011**, 1-5.
- Mladenović, M., Paprika, M., Marinković, A. 2018. Denitrification techniques for biomass combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 3350-3364.
- Møller, H.B., Jensen, H.S., Tobiasen, L., Hansen, M.N. 2007. Heavy metal and phosphorus content of fractions from manure treatment and incineration. *Environ Technol*, **28**(12), 1403-18.
- Nzihou, A., Stanmore, B. 2013. The fate of heavy metals during combustion and gasification of contaminated biomass—A brief review. *Journal of Hazardous Materials*, **256-257**, 56-66.
- Olesen, J.E., Sommer, S.G. 2005. Effekt af afbrænding af separeringsproduktioner på drivhusgasemissioner og luftforurening (NH₃ og NO_x). in: *Rapport fra Arbejdsgruppen om afbrænding af fraktioner af husdyrgødning*, (Ed.) A.o.a.a.f.a. husdyrgødning, pp. 84-88.
- Ottosen, A.R. 2011. Fra bioaske til gødning. *FiB*, **36**(Juni 2011), 12-13.
- Pantelopoulou, A., Magid, J., Jensen, L.S. 2016. Thermal drying of the solid fraction from biogas digestate: Effects of acidification, temperature and ventilation on nitrogen content. *Waste Management*, **48**, 218-226.
- Pedrazzi, S., Allesina, G., Belló, T., Rinaldini, C.A., Tartarini, P. 2015. Digestate as bio-fuel in domestic furnaces. *Fuel Processing Technology*, **130**, 172-178.
- Petersen, J., Sørensen, P. 2006. Afbrænding af husdyrgødning. *Vand & Jord*, **13**(4), 157-159.
- Petersen, J., Sørensen, P., Rubæk, G.H., Hansen, J.F. 2005. Konsekvenser for gødningsværdien ved afbrænding af husdyrgødning. in: *Rapport fra Arbejdsgruppen om afbrænding af fraktioner af husdyrgødning*, (Ed.) A.o.a.a.f.a. husdyrgødning, pp. 91-96.
- Poulsen, H.D., Møller, H.B., Klinglmair, M., Thomsen, M. 2019. Husdyrs fosforudnyttelse og fosfors værdikæde fra husdyrgødning, bioaffald og spildevand.
- Rehl, T., Müller, J. 2011. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, **56**(1), 92-104.
- Retsinformation.dk. 2018. Affald til jord-bekendtgørelsen (BEK nr 1001 af 27/06/2018) Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål, (Ed.) M.-o. Fødevareministeriet, Retsinformation.dk.
- Retsinformation.dk. 2017. Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen (BEK nr 1271 af 21/11/2017) Bekendtgørelse om anlæg, der forbrænder affald, (Ed.) M.-o. Fødevareministeriet, Retsinformation.dk.
- Retsinformation.dk. 2019a. Bioaskebekendtgørelsen (BEK nr 732 af 09/07/2019) Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål, (Ed.) M.-o. Fødevareministeriet, Retsinformation.dk.
- Retsinformation.dk. 2019b. Husdyrgødningsbekendtgørelsen (BEK nr 760 af 30/07/2019) Bekendtgørelse om miljøregulering af dyrehold og om opbevaring og anvendelse af gødning, (Ed.) M.-o. Fødevareministeriet, Retsinformation.dk.
- Risberg, K., Cederlund, H., Pell, M., Arthurson, V., Schnürer, A. 2017. Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure – Chemical composition and effects on soil microbial activity. *Waste Management*, **61**, 529-538.
- Rubæk, G.H. 2018. Fosforstrømme, -balancer og -udnyttelse i dansk landbrug. Nr. 141 ed. in: *Gødningsværdi af fosfor i restprodukter*, (Eds.) G.H. Rubæk, M. Askegaard, N.H. Christiansen, Vol. DCA Rapport nr. 141, Aarhus Universitet, pp. 11-16.
- Schou, J.S., Gyldenkerne, S., Grant, R., Elmegaard, N., Palmgreen, F., Levin, G. 2006. Miljøkonsekvenser ved afbrænding af husdyrgødning med sigte på energiudnyttelse.
- Schwärter, R.C., Grant, R. 2003. Undersøgelse af miljøfremmede stoffer i gylle. Danmarks Miljøundersøgelser, Miljøministeriet.
- SEGES. 2019. Udfasning af medicinsk zink, Vol. 2019, SEGES Svineproduktion.

- Shankar Pandey, D., Kwapinska, M., Leahy, J.J., Kwapinski, W. 2019. Fly Ash From Poultry Litter Gasification – Can it be Utilised in Agriculture Systems as a Fertiliser? *Energy Procedia*, **161**, 38-46.
- Simbolon, L.M., Pandey, D.S., Horvat, A., Kwapinska, M., Leahy, J.J., Tassou, S.A. 2019. Investigation of Chicken Litter Conversion into Useful Energy Resources by Using Low Temperature Pyrolysis. *Energy Procedia*, **161**, 47-56.
- Skov, S. 2019. Simon Skov, seniorrådgiver, Københavns Universitet.
- Skov, S., Ingerslev, M. Bioaske - recirkulering af næringsstoffer fra biobrændsel, Skov & Landskab, Københavns Universitet.
- Skov, S., Jensen, J.Ø. 2015. Afbrænding af gyllefibre og recirkulering af fosfor. F&U-projekt 2012-1. Dansk Fjernvarme. Københavns Universitet.
- Sommer, S.G., Hjorth, M., Leahy, J.J., Zhu, K. 2015. Pig slurry characteristics, nutrient balance and biogas production as affected by separation and acidification. *The Journal of Agricultural Science*, **153**(1), 177-191.
- Svanberg, M., Finnsigård, C., Flodén, J., Lundgren, J. 2018. Analyzing animal waste-to-energy supply chains: The case of horse manure. *Renewable Energy*, **129**, 830-837.
- Sørensen, P. 2018. Gødningsværdi af fosfor i aske og aske-lignende produkter. in: *Temamøde 23/8 2018*, pp. https://www.google.dk/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=47&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiZ3NbB1_jkAhXGL1AKHbrDBXI4KBAWMAZ6BAgGEAI&url=https%3A%2F%2Fgenanvendbiomasse.dk%2F~%2Fmedia%2Fbgorj%2Fnyheder%2F2018%2Fpeter-soerensen-aske-goedp-23-aug-2018.pdf%3F1a%3Dda&usq=AOvVaw2agcJafTe5byc5zc983Ce
- Sørensen, P., Rubæk, G.H. 2011. Tilgængelighed af fosfor i aske fra forbrænding af gyllefibre og husdyrgødning. in: *Plantekongres*, Vol. 2011, Aarhus Universitet, Københavns Universitet, Videncentret for Landbrug. Herning, pp. 103-104.
- Tambone, F., Orzi, V., D'Imporzano, G., Adani, F. 2017. Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. *Bioresource Technology*, **243**, 1251-1256.
- Tańczuk, M., Junga, R., Werle, S., Chabiński, M., Ziółkowski, Ł. 2019. Experimental analysis of the fixed bed gasification process of the mixtures of the chicken manure with biomass. *Renewable Energy*, **136**, 1055-1063.
- Thygesen, A.M., Wernberg, O., Skou, E., Sommer, S.G. 2011. Effect of incineration temperature on phosphorus availability in bio-ash from manure. *Environ Technol*, **32**(5-6), 633-8.
- Thygesen, O., Johnsen, T. 2012. Manure-based energy generation and fertiliser production: Determination of calorific value and ash characteristics. *Biosystems Engineering*, **113**(2), 166-172.
- Thygesen, O., Sommer, S.G., Shin, S.G., Triolo, J.M. 2014. Residual biochemical methane potential (BMP) of concentrated digestate from full-scale biogas plants. *Fuel*, **132**, 44-46.
- Vamvuka, D., Kaniadakis, G., Pentari, D., Alevizos, G., Papapolikarpou, Z. 2017. Comparison of ashes from fixed/fluidized bed combustion of swine sludge and olive by-products. Properties, environmental impact and potential uses. *Renewable Energy*, **112**, 74-83.
- Vardhan, K.H., Kumar, P.S., Panda, R.C. 2019. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, **290**, 111197.
- Vassilev, S.V., Vassileva, C.G., Song, Y.-C., Li, W.-Y., Feng, J. 2017. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel*, **208**, 377-409.
- Westborg, S., Johansen, L.P., Christensen, B.H. 2010. Brændstofvurderinger på husdyrgødninger. Miljøstyrelsen, Miljøministeriet.
- Widyasari-Mehta, A., Hartung, S., Kreuzig, R. 2016. From the application of antibiotics to antibiotic residues in liquid manures and digestates: A screening study in one European center of conventional pig husbandry. *Journal of Environmental Management*, **177**, 129-137.

- Yan, Y., Zhang, L., Feng, L., Sun, D., Dang, Y. 2018. Comparison of varying operating parameters on heavy metals ecological risk during anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover. *Bioresource Technology*, **247**, 660-668.
- Zhou, S., Han, L., Huang, G., Yang, Z., Peng, J. 2018. Pyrolysis characteristics and gaseous product release properties of different livestock and poultry manures: Comparative study regarding influence of inherent alkali metals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **134**, 343-350.

Bilag 1. Analysecertifikater

Prøvningsrapport

RAPPORTNUMMER:

Projekt om forbrændt husdyrgødning



**DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE**

Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
DK-8000 Aarhus C
+45 72 20 20 00
Info@teknologisk.dk
www.teknologisk.dk

Side 1 af 4
Init: HNI/TNJ
Antal bilag: 0

Rekvirent: Firma: Miljøstyrelsen

Emne: 14 askeprøver udtaget efter forbrænding på Teknologisk Institut

Prøve id.: 1. Hønsemøg
2. Hestemøg
3. Sogylle-fiber
4. Sogylle-fiber + halmpiller
5. Biogas-fiber
6. Biogas-fiber + halmpiller
7. Halmpiller

Periode: Analyse er gennemført: 16-10-2019 - 13-11-2019.

Resultat: Resultat fremgår på de efterfølgende sider.

Opbevaring: Referenceprøve gemmes i 6 måneder.

Bemærkninger:

Vilkår: Prøvningen er udført akkrediteret i henhold til gældende vilkår fastlagt af DANAK, jf. www.danak.dk, og i henhold til Teknologisk Instituts almindelige vilkår, som er gældende på tidspunktet for aftaleindgåelsen. Prøveresultaterne gælder udelukkende for det prøvede emne. Prøvningsrapporten må kun gengives i uddrag, hvis laboratoriet skriftligt har godkendt uddraget

Sted: Dato 27-11-2019, Teknologisk Institut, Aarhus, Biomasse Laboratoriet

Underskrift:

Helena Nielsen
Laborant

Torben Nørgaard Jensen
Kvalitetssikring



 **DANAK**
Test reg. no. 300



1.1 Hønsemøg					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,9	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,003%
Glødetab:	1,9	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	0,7%
pH:	11,9	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,1%
Ledningsevne:	1681	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	3,6%

1.2 Hønsemøg					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	100,0	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,002%
Glødetab:	1,5	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	1,3%
pH:	11,7	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,3%
Ledningsevne:	1322	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	1,7%

2.1 Hestemøg					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	100,1	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,02%
Glødetab:	1,8	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	3,4%
pH:	12,4	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,2%
Ledningsevne:	1875	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	1,2%

2.2 Hestemøg					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	100,0	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,005%
Glødetab:	0,9	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	2,2%
pH:	12,2	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,1%
Ledningsevne:	1566	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,3%

3.1 Sogyll-fiber					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,9	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,005%
Glødetab:	0,8	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	2,5%
pH:	11,6	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,1%
Ledningsevne:	335	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	3,9%

3.2 Sogyll-fiber					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,9	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,002%
Glødetab:	0,8	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	5,0%
pH:	11,7	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,1%
Ledningsevne:	369	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	1,5%



4.1 Sogylle-fiber + halmpiller

Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,9	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,003%
Glødetab:	2,0	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	3,9%
pH:	12,0	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,1%
Ledningsevne:	1111	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	5,9%

4.2 Sogylle-fiber + halmpiller

Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,6	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,007%
Glødetab:	4,8	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	0,8%
pH:	12,0	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,1%
Ledningsevne:	1231	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,8%

5.1 Biogas-fiber

Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,8	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,007%
Glødetab:	2,8	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	1,4%
pH:	12,2	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,0%
Ledningsevne:	995	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,3%

5.2 Biogas-fiber

Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,9	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,002%
Glødetab:	1,1	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	0,6%
pH:	12,2	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,1%
Ledningsevne:	751	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	1,8%

6.1 Biogas-fiber + halmpiller

Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,3	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,008%
Glødetab:	4,5	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	0,9%
pH:	11,7	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,2%
Ledningsevne:	1669	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	1,5%

6.2 Biogas-fiber + halmpiller

Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,7	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,005%
Glødetab:	1,9	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	1,0%
pH:	11,7	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,3%
Ledningsevne:	1136	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	2,2%



7.1 Halmpiller					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	99,7	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,01%
Glødetab:	5,0	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	1,8%
pH:	11,7	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,1%
Ledningsevne:	1194	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,8%

7.2 Halmpiller					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Tørstofindhold:	100,1	%	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,005%
Glødetab:	1,8	%	Tør basis	Metodeblad 1 ¹⁾	1,8%
pH:	11,9	-	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,04%
Ledningsevne:	1078	mS/m	Som modtaget	Metodeblad 1 ¹⁾	0,4%

Analysemetoder i henhold til gældende standarder.

* Relativ standardafvigelse lavet på 3 dobbeltbestemmelse.

¹⁾ Ikke omfattet af akkrediteringen.

Prøvningsrapport

RAPPORTNUMMER:
Projekt om forbrændt husdyrgødning



**DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE**

Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
DK-8000 Aarhus C
+45 72 20 20 00
Info@teknologisk.dk
www.teknologisk.dk

Side 1 af 2
Init: HNI/TNJ
Antal bilag: 0

Rekvirent: Firma: Miljøstyrelsen

Emne: 7 husdyrgødninger udtaget på Teknologisk Institut

Prøve id.: 1. Hønsemøg
2. Hestemøg
3. Sogylle-fiber
4. Sogylle-fiber + halmpiller
5. Biogas-fiber
6. Biogas-fiber + halmpiller
7. Halmpiller

Periode: Analyse er gennemført: 15-11-2019 - 19-11-2019.

Resultat: Resultat fremgår på de efterfølgende sider.

Opbevaring: Referenceprøve gemmes i 6 måneder.

Bemærkninger:

Vilkår: Prøvningen er udført akkrediteret i henhold til gældende vilkår fastlagt af DANAK, jf. www.danak.dk, og i henhold til Teknologisk Instituts almindelige vilkår, som er gældende på tidspunktet for aftaleindgåelsen. Prøveresultaterne gælder udelukkende for det prøvede emne. Prøvningsrapporten må kun gengives i uddrag, hvis laboratoriet skriftligt har godkendt uddraget

Sted: Dato 27-11-2019, Teknologisk Institut, Aarhus, Biomasse Laboratoriet

Underskrift:

Helena Nielsen
Laborant

Torben Nørgaard Jensen
Kvalitetssikring



 **DANAK**
Test reg. no. 300



1. Hønsemøg					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Askeindhold	19,1	%	Tør basis	EN/ISO 18122	0,8
Rumvægt	400	kg/m ³	Som modtaget	Estimat ¹⁾	-

2. Hestemøg					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Askeindhold	5,4	%	Tør basis	EN/ISO 18122	2,0
Rumvægt	200	kg/m ³	Som modtaget	Estimat ¹⁾	-

3. Sogyll-fiber					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Askeindhold	23,2	%	Tør basis	EN/ISO 18122	2,5
Rumvægt	250	kg/m ³	Som modtaget	Estimat ¹⁾	-

4. Sogyll-fiber + halmpiller					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Askeindhold	8,6	%	Tør basis	EN/ISO 18122	1,6
Rumvægt	250	kg/m ³	Som modtaget	Estimat ¹⁾	-

5. Biogas-fiber					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Askeindhold	10,2	%	Tør basis	EN/ISO 18122	0,5
Rumvægt	190	kg/m ³	Som modtaget	Estimat ¹⁾	-

6. Biogas-fiber + halmpiller					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Askeindhold	6,9	%	Tør basis	EN/ISO 18122	0,1
Rumvægt	230	kg/m ³	Som modtaget	Estimat ¹⁾	-

7. Halmpiller					
Analyse	Resultat	Enhed	Bemærkninger	Metode	RSD* +/-
Askeindhold	6,6	%	Tør basis	EN/ISO 18122	0,8
Rumvægt	600	kg/m ³	Som modtaget	Estimat ¹⁾	-

Analysemetoder i henhold til gældende standarder.

* Relativ standardafvigelse lavet på dobbeltbestemmelse.

¹⁾ Ikke omfattet af akkrediteringen.

ANALYSERAPPORT 362461
Teknologisk Institut

 Energi og klima
 Kongsvang Alle 29
 8000 Århus C

Version: 1
Sagsnr:
Rekv. nr:
Genereret: 27.11.2019
Bilag:

LAB nr:	19-29850, Prøve nr. 416128	Prøvetager:	Teknologisk Institut				
Prøvemærkning:	ID: 1.1	Prøvetagningsmetode:	-				
Prøvetype:	Bioaske	Prøvetagningstidspunkt:	-				
Prøvested:	Teknologisk Inst. Århus	Prøvetagningssted:					
Grænseværdier:	Ikke oplyst	Analyseperiode:	01.11.2019 - 27.11.2019				
Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	94500 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	108000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	2.6 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	42 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	9.6 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.13 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	193 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	1160 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	9250 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr:	19-29851, Prøve nr. 416129	Prøvetager:	Teknologisk Institut				
Prøvemærkning:	ID: 1.2	Prøvetagningsmetode:	-				
Prøvetype:	Bioaske	Prøvetagningstidspunkt:	-				
Prøvested:	Teknologisk Inst. Århus	Prøvetagningssted:					
Grænseværdier:	Ikke oplyst	Analyseperiode:	01.11.2019 - 27.11.2019				
Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	96200 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	103000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	2.6 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	40 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	12 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.10 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	179 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	876 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	6080 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29852, Prøve nr. 416130
Prøvemærkning: ID: 2.1
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	26800 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	153000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	5.1 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	14 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	23 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.14 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	220 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	337 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	4410 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29853, Prøve nr. 416131
Prøvemærkning: ID: 2.2
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	25500 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	148000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	5.7 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	16 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	26 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.12 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	235 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	328 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	145 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29854, Prøve nr. 416132
Prøvemærkning: ID: 3.1
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	48700 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	9560 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	3.1 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	17 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	41 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.10 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	101 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	362 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	4110 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29855, Prøve nr. 416133
Prøvemærkning: ID: 3.2
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	50900 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	10300 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	3.3 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	18 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	43 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.12 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	99 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	350 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	4130 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29856, Prøve nr. 416134
Prøvemærkning: ID: 4.1
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	21900 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	119000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	5.0 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	16 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	30 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.08 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	91 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	349 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	0.2 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	8230 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29857, Prøve nr. 416135
Prøvemærkning: ID: 4.2
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	22000 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	112000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	4.1 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	15 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	34 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.09 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	85 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	293 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	22600 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29858, Prøve nr. 416136
Prøvemærkning: ID: 5.1
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	28000 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	38000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	2.6 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	24 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	48 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.23 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	85 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	342 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	13300 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29859, Prøve nr. 416137
Prøvemærkning: ID: 5.2
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	29300 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	35900 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	2.8 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	25 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	52 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.18 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	86 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	300 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	4780 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29860, Prøve nr. 416138
Prøvemærkning: ID: 6.1
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	20400 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	161000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	3.9 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	14 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	29 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.15 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	71 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	284 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	0.3 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	16600 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29861, Prøve nr. 416139
Prøvemærkning: ID: 6.2
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	20600 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	160000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	6.0 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	15 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	32 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	0.09 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	76 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	269 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	0.4 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	6970 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29862, Prøve nr. 416140
Prøvemærkning: ID: 7.1
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	11600 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	189000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	2.2 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	12 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	26 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	<0.02 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	49 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	100 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	31900 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

LAB nr: 19-29863, Prøve nr. 416141
Prøvemærkning: ID: 7.2
Prøvetype: Bioaske
Prøvested: Teknologisk Inst. Århus
Grænseværdier: Ikke oplyst

Prøvetager: Teknologisk Institut
Prøvetagningsmetode: -
Prøvetagningstidspunkt: -
Prøvetagningssted: -
Analyseperiode: 01.11.2019 - 27.11.2019

Analyseparameter	Resultat	Min	Max	Udenfor	D.L.	Metode/Reference	+/-
Total-P	12400 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kalium	201000 mg/kg TS	-	-		2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kviksølv	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0026 DS 259/EN1483	10%
Bly	2.2 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Nikkel	11 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Chrom	28 mg/kg TS	-	-		0.1	M-0071 DS 259/ICP	10%
Cadmium	<0.02 mg/kg TS	-	-		0.02	M-0071 DS 259/ICP	10%
Kobber	49 mg/kg TS	-	-		0.2	M-0071 DS 259/ICP	10%
Zink	94 mg/kg TS	-	-		1	M-0071 DS 259/ICP	10%
PAH aske	<0.1 mg/kg TS	-	-		0.1	*GC-MS	15%
TOC	4930 mg/kg TS	-	-		100	*EN 15936	10%

Rekvirent: Teknologisk Institut
Kopi:

Nørresundby d. 27.11.2019

Forklaring:

D.L.: Detektionsgrænse

<: Mindre end

*: Ikke omfattet af akkrediteringen

+/-: Total ekspanderet usikkerhed (2x total RSD%)

>: Større end



Annemette Christensen, laborant

Analyserapporten må kun gengives i uddrag, hvis den enten er offentlig tilgængelig, eller hvis laboratoriet har godkendt uddraget.
Resultaterne gælder udelukkende for de analyserede prøver.

Analyserapport 362461 - Side 6 af 6

Miljøprojekt om forbrændt husdyrgødning – litteraturstudie og forbrændingsforsøg

Der er gennemført et litteraturstudie og forbrændingsforsøg for at afdække forhold omkring forbrænding af husdyrgødning til energiformål med særlig fokus på indholdsstoffer i aske fra forbrændingen. Baggrunden for udarbejdelsen af rapporten er at der lovgivningsmæssigt er åbnet op for, at husdyrgødning på visse betingelser kan forbrændes. Der er imidlertid ikke afklaring mht. nyttiggørelse af aske fra forbrændt husdyrgødning, og dette projekt har til formål at bidrage til denne afklaring, både mht. indhold af plantenæringsstoffer såvel som uønskede stoffer som tungmetaller m.m. Resultaterne af projektet skal bidrage med opsamling af eksisterende viden fra litteraturen samt resultater fra nye forbrændingsforsøg med forskellige typer af husdyrgødning. Tilsammen skal dette bidrage til grundlaget for en evt. regulering af nyttiggørelse af aske fra forbrænding af husdyrgødning til jordbrugsformål.

Det konkluderes, at aske fra forbrænding af husdyrgødning i overvejende grad overholder grænseværdierne gældende for aske fra forbrænding af træ og halm, der bruges til jordbrugsformål, men at der bør tilføjes grænseværdier for kobber og zink. Det konkluderes, at det fra et miljømæssigt perspektiv er oplagt at anvende samme grænseværdier for aske fra forbrænding af halm, træ og husdyrgødning ifm. jordbrugsformål.

Det konkluderes yderligere, at forbrænding af husdyrgødning kan give mulighed for udnytte energiindholdet i gødningen og, at opkoncentrere næringsstoffer i en askefraktion. Dog mistes kvælstof og kulstof i gødningen. Opkoncentrering af næringsstoffer i aske ved forbrænding af husdyrgødning vil kunne give landbrugsmæssige fordele, da det gør det realistisk at transportere næringsstoffer over betydeligt større afstande og dermed udnyttelse i områder med større næringsstofbehov.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk