



HUSDYRS FOSFORUDNYTTELSE OG FOSFORS VÆRDIKÆDE FRA HUSDYRGØDNING, BIOAFFALD OG SPILDEVAND

Faglig baggrundsrapport for fosforvidensyntese

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 325

2019



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

HUSDYRS FOSFORUDNYTTELSE OG FOSFORS VÆRDIKÆDE FRA HUSDYRGØDNING, BIOAFFALD OG SPILDEVAND

Faglig baggrundsrapport for fosforvidensyntese

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 325

2019

Hanne Damgaard Poulsen¹

Henrik Bjarne Møller²

Manfred Klinglmair³

Marianne Thomsen³

¹ Aarhus Universitet, Institut for Husdyrvidenskab

² Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab

³ Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 325
Titel:	Husdyrs fosforudnyttelse og fosfors værdikæde fra husdyrgødning, bioaffald og spildevand
Undertitel:	Faglig baggrundsrapport for fosforvidensyntese
Forfattere:	Hanne Damgaard Poulsen ¹ , Henrik Bjarne Møller ² , Manfred Klinglmair ³ & Marianne Thomsen ³
Institutioner:	Aarhus Universitet, ¹ Institut for Husdyrvidenskab, ² Institut for Ingeniørvidenskab & ³ Institut for Miljøvidenskab
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Juni 2019
Redaktion afsluttet:	Juni 2019
Faglig kommentering:	Gitte Rubæk, Peter Sørensen og Hans Estrup Andersen
Kvalitetssikring, DCE:	Signe Jung-Madsen
Sproglig kvalitetssikring:	Anne Mette Poulsen
Finansiell støtte:	Miljøstyrelsen
Bedes citeret:	Poulsen, H.D., Møller, H.B., Klinglmair, M. & Thomsen, M. 2019. Husdyrs fosforudnyttelse og fosfors værdikæde fra husdyrgødning, bioaffald og spildevand. Faglig baggrundsrapport for fosforvidensyntese. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 84 s. - Videnskabelig rapport nr. 325 http://dce2.au.dk/pub/SR325.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	I denne rapport præsenteres status for de globale fosforressourcer og der undersøges forskellige muligheder i forhold til at forbedre udnyttelsen af de nationale fosforressourcer og dermed mindske forbruget og udledningerne af fosfor til miljøet. Det kan man bl.a. gøre ved at sørge for en bedre fordeling af husdyrgødning mellem landsdelene. Det kræver at fosfor i husdyrgødningen opkoncentreres, med henblik på at mindske transportomkostningerne. Derudover er der et potentiale i forhold til at udnytte fosforressourcer i spildevandsslam og madaffald bedre og i forhold til at reducere fosforudskillelsen fra husdyrene, således at fosforindholdet i husdyrgødningen mindskes
Emneord:	fosfor, fosforressource, fosforforbrug, husdyrgødning, spildevand, fosfor-værdikæde, recirkulering af fosfor, fosforudnyttelse hos husdyr
Layout:	Grafisk Værksted, AU Silkeborg
Foto forside:	Solrød Biogas A/S.
ISBN:	978-87-7156-411-2
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	84
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR325.pdf

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	9
1. Fosfor som ressource	12
1.1 Udvinning og reserver af fosfor	12
1.2 Forventet udvikling i globalt forbrug af mineralsk P	12
1.3 Usikkerheder forbundet med "peak phosphorus"	13
1.4 Fosforforbruget i EU 27	13
1.5 Fosforkilder i Danmark med potentiale for genanvendelse inkl. husdyrgødning og affald	15
2. Fosforværdikæder fra husdyrgødning og bioaffald	16
2.1 Husdyrgødning	16
2.2 Spildevand	34
2.3 Fosforværdikæder fra organisk husholdnings- og industriel bioaffald	41
2.4 Potentialer på tværs af sektorer	43
2.5 Opsummering og perspektivering	45
3. Optimering af fodring af husdyr – således at udnyttelsen af fosfor øges og udskillelsen reduceres	51
3.1 Indledning	51
3.2 Fosfor – et livsnødvendigt næringsstof til husdyr	51
3.3 Aktuel tilførsel, udnyttelse og udskillelse af fosfor hos danske husdyr pr. enhed og på landsplan	52
3.4 Muligheder og udfordringer	56
3.5 Værktøjer til at forbedre fosforudnyttelsen hos husdyr	63
3.6 Muligheder og barrierer for fortsat forbedring af udnyttelsen af fosfor	68
3.7 Husdyrenes udnyttelse af fosfor – status ift. sammenlignelige udenlandske produktioner	69
3.8 Overordnet vurdering af muligheder for at reducere udskillelsen af fosfor fra de forskellige husdyrarter	71
3.9 Konklusion og perspektiver	71
4. Referencer	75

[Tom side]

Forord

Denne rapport udgør sammen med DCE's fosforreddegørelse fra 2016 "Redegørelse for udvikling i landbrugets fosforforbrug, tab og påvirkning af vandmiljøet" (Andersen et al., 2016) den faglige dokumentation for den sammenfattende pjece "Fosfor i dansk landbrug – ressource og miljøudfordring, en fosforvidensyntese" målrettet til det politiske beslutningsniveau, som Miljø- og Fødevareudvalget besluttede skulle udarbejdes i forbindelse med gennemførelse af ændring af lov om miljøgodkendelse m.v. af husdyrbrug (husdyrbrugsloven), hvor der bl.a. blev introduceret fosforlofter.

Miljø- og Fødevareministeriet har anmodet DCE, Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet om at udarbejde fosforvidensyntesen. Der er i en tillægsbetænkning til lovforslaget (af 21/2 2017) angivet følgende beskrivelse af vidensyntesen:

"Teknologiske løsninger og ny viden om anvendelse, udledning og recirkulation af fosfor er i stadig udvikling. Denne viden skal bringes i anvendelse. Flertallet er derfor enige om, at der på kort sigt skal gennemføres en fosforvidensyntese, der beskriver fosfor som naturressource, landbrugets anvendelse samt udledning af fosfor samt miljøpåvirkninger forbundet hermed. Syntesen skal fokusere på erhvervets muligheder for at optimere fodringen af husdyr, så fosforudledningen begrænses. Desuden skal syntesen indeholde en teknologiliste, der beskriver muligheder og potentialer for udvinding og recirkulation af fosfor, mhp. at fosforoverskuddet i dele af området kan ændres fra en miljøudfordring til en ressource, der kan udnyttes".

Formålet med fosforvidensyntesen (pjece) er beskrevet således i Miljø- og Fødevareministeriets bestilling til DCE:

"Formålet med vidensyntesen er at skabe overblik over den samlede værdikæde for fosfor i landbruget samt pege på barrierer og udviklingsbehov. Der ønskes herunder en tværgående syntese, som fokuserer på synergier, udviklingsmuligheder, behov og dilemmaer i forhold til at sikre en bedre udnyttelse af fosforressourcerne på tværs i landbrugssektoren. Det er herunder vigtigt, at der som del af vidensyntesen udarbejdes en række anbefalinger til fremadrettede fokusområder i forhold til at udvikle og forbedre landbrugets fosforudnyttelse og reducere fosforudledningen til vandmiljøet. Vidensyntesen skal kunne understøtte den videre udvikling på området og danne grundlag for Miljø- og Fødevareministeriets fremtidige beslutningsgrundlag".

Nærværende rapport omhandler emnerne globale og nationale fosforressourcer, fosforværdikæder fra husdyrgødning, spildevandsslam og bioaffald, optimering af fosforoptaget hos husdyr samt anbefalinger til tiltag, der kan forbedre fosforudnyttelsen lokalt og nationalt og dermed mindske udledningen til vandmiljøet. I den tidligere udgivne DCE-rapport "Redegørelse for udvikling i landbrugets fosforforbrug, tab og påvirkning af vandmiljøet" (Andersen et al., 2016), gives en beskrivelse af fosforforbruget i dansk landbrug, fosfortabet fra markerne og påvirkningen af vandmiljøet. Sammen udgør de to rapporter den faglige dokumentation, som pjecen bygger på.

Sammenfatning

I denne rapport præsenteres status for de globale fosforressourcer, og der undersøges forskellige muligheder i forhold til at forbedre udnyttelsen af de nationale fosforressourcer og dermed mindske forbruget og udledningerne af fosfor til miljøet. Det kan man bl.a. gøre ved at sørge for en bedre fordeling af fosfor på landsplan og udnytte fosforressourcer i spildevandsslam og madaffald bedre, så man kan begrænse indkøb af handelsgødning. Derudover kan man arbejde mod at reducere fosforudskillelsen fra husdyrene, således at fosforindholdet i husdyrgødningen mindskes.

De globale fosforressourcer

Der har været udvundet råfosfat fra miner til fremstilling af mineralsk fosforgødning og foderfosfat til husdyr gennem mange år.

EU's import af råfosfat kommer hovedsageligt fra Nordafrika, Rusland og Mellemøsten, hvilket gør EU afhængig af import fra relativt få producerende regioner, som på lang sigt kan udgøre en strategisk, dvs. en (handels)politisk trussel. Der er i dag ikke mangel på fosfor på globalt plan, men koncentrationen af fosfatproduktionen på forholdsvis få lande kan potentielt føre til mangelsituationer som følge af økonomiske eller politisk / strategiske kriser.

De kendte globale fosforreserver omfatter ca. 71 Gt med en verdensproduktion af råfosfat på ca. 0,2 Gt årligt. Hertil kommer, at der er store fosforressourcer i bl.a. Saudi-Arabien, USA, Peru, Kasakhstan og Estland, hvor udvinning i dag er vurderet som økonomisk urentabel (dvs. for dyr med de nuværende handelspriser). Det er derfor sandsynligt, at eventuel knaphed på råfosfat på det globale marked vil opstå på grund af økonomiske eller politiske årsager frem for en reel knaphed på råfosfat.

Omfordeling af husdyrgødning

Der er som udgangspunkt tilstrækkeligt fosfor i Danmark til at dække landbrugets nuværende behov for fosfor til afgrødedyrkning, uden at der skal importeres fosfor som handelsgødning.

Problemet er, at den tilgængelige fosfor ikke er jævnt fordelt over landet, idet der generelt set er et overskud i Jylland, hvor der findes mange store husdyrbrug, mens der er et underskud øst for Storebælt, hvor bedrifterne domineres af planteavl. Derfor er en opkoncentrering af fosfor i husdyrgødningen vigtig for at reducere transportomkostningerne ved at bringe fosfor fra Jylland til Sjælland og Fyn.

Flytning af fosfor i gylle over større afstande er billigere, hvis den faste del af gyllen, hvor en meget stor del af fosfor findes, skilles fra den flydende del. Herved forbedres mulighederne for at fragte den faste del og det meste fosfor over længere strækninger. Den flydende del, som er rig på kvælstof, kan udnyttes lokalt.

Der findes en lang række tekniske løsninger til at skille den faste del fra gyllen – fra simple presser og centrifuger til mere avancerede metoder som membranteknik, inddampning, ultrafiltrering og omvendt osmose. Overordnet

vurderet vil kun de simple metoder på nuværende tidspunkt have en drifts-økonomi, som vil kunne gøre en separation attraktiv, og det kræver samtidigt, at der kan behandles store mængder gødning. Derfor har biogasanlæggene en vigtig rolle i forhold til opkoncentrering af fosfor fra husdyrgødningen.

Fosforressourcer i spildevandsslam og madaffald

Husdyrgødningen indeholder 80 % af den potentielle danske fosforressource, dvs. uden indregning af handelsgødningsfosfor. De resterende 20 % kommer fra en række mindre kilder, hvor spildevandsslam og KOD (Kildesorteret Organisk Dagrenovation) udgør næsten 18 af disse 20 %. De øvrige mindre kilder omtales ikke yderligere her, men de kan have stor lokal betydning. Ligesom for husdyrgødning er der forskellige metoder til at nyttiggøre fosfor i spildevand, spildevandsslam og i aske fra slamforbrænding. Fælles for disse metoder er, at omkostningerne pr. kg fosfor for spildevandsslam ikke kan konkurrere med fosfor fra handelsgødning, ligesom der aktuelt ikke er villighed til at betale for næringsstofværdien af produkterne.

Fosforværdikæder og recirkulering af fosfor

Hvis brugen af handelsgødningsfosfor ønskes erstattet med fosfor fra fx husdyrgødning eller spildevandsslam, er omkostningerne forbundet med brugen af de forskellige gødningstyper centrale.

Direkte udbringning af ubehandlet gylle, afgasset biomasse og fjerkrægødning giver en betydelig økonomisk gevinst i forhold til anvendelse af fosfor i handelsgødning, da der samtidigt tilføres andre næringsstoffer. For de flydende gødninger kræves en lokal anvendelse (<20 km), mens fjerkrægødning kan transporteres relativt langt og samtidigt være et billigt alternativ til anvendelse af handelsgødning pga. fjerkrægødningens høje tørstofindhold.

Hvis gyllen skal transporteres over længere afstande (fx 100 km), er det nødvendigt at separere gyllen i en fast og flydende fraktion for at mindske omkostningerne til transport. Værdien af næringsstofferne kan dog ikke opveje omkostningerne ved separering og transport, og handelsgødning vil derfor være et billigere alternativ.

Ligesom det er tilfældet med husdyrgødning, er direkte udbringning af spildevandsslam en mulighed for recirkulering af fosfor til landbrugsjord. Ca. 2/3 udbringes direkte i dag, selvom spildevandsslam har en negativ markedsværdi ved direkte udbringning. Slammet kan derudover udrådnes (i biogasanlæg), enten separat eller sammen med andre organiske materialer (som fx organisk husholdningsaffald), eller mineraliseres (i tilplantede bassiner). Derudover kan der udfældes struvit (magnesiumammoniumfosfat) som gødningsprodukt fra spildevand, eller slammet forbrændes, hvorefter asken oparbejdes til fosforgødning. For struvit, eller enkelte processer til oparbejdning af aske, findes der processer, som er markedsmodne eller nærmer sig markedsmodenhed. Disse teknologier er i stand til at levere slutprodukter, som overholder kvalitetskravene (især om tungmetalindholdet) i hhv. affald-til-jord-bekendtgørelsen (slambekendtgørelsen) og bioaskebekendtgørelsen.

Reduktion af fosforudskillelsen fra husdyr

Husdyrgødningen indeholder den helt overvejende del af den danske fosformængde svarende til omkring 80 % af den samlede tilgængelige fosformængde, der bruges til plantedyrkning. Fosfortilførslen til landbrugsjorden kan derfor mindskes ved at reducere den mængde fosfor, som husdyrene udskiller i gødningen. Gennem årene er udskillelsen af fosfor fra husdyrene blevet reduceret markant gennem mindsket foderforbrug (forbedret fodereffektivitet) og gennem ændringer af fodringen bl.a. ved brug af fytase til udfasning af foderfosfat. Mulighederne for at reducere husdyrenes udskillelse af fosfor er ikke fuldt udtømte, selvom potentialet afviger meget for de forskellige husdyrarter. Overordnet er mulighederne for reduktion primært knyttet til to spor inden for fodring:

- (i) øget fordøjelighed af fosfor i foderstofferne,
- (ii) forbedret tilpasning af foderets indhold af fordøjeligt fosfor til dyrenes aktuelle behov og genetiske potentiale.

Nogle husdyrbedrifter er udfordret på forholdet mellem kvælstof og fosfor (N:P forhold) i husdyrgødningen, idet forholdet i gødningen fra især grise- og fjerkræproduktionen er meget lav, mens andre er udfordret af et højt indhold af fosfor i foderstoffer og –afgrøder. De fleste udfordres også af kravet om øget brug af alternative proteinkilder til sojaskrå, idet disse kilder ofte indeholder relativt meget mere fosfor end soja. Derfor kræves der sikker viden om de enkelte tiltag, før potentialerne kan udnyttes i praksis.

Sideeffekter af tiltag

En del af de strategier og teknologiske løsninger til recirkulering og brug af fosfor, der nævnes i denne rapport, kan have en række negative sideeffekter i forhold til fx klima og miljø. Det gælder fx fremstillingen af biogas og kompostering af affald, der kan medføre emission af ammoniak og lattergas. Ligeledes kan der være udfordringer i forhold til opkoncentrering af tungmetaller ved genanvendelse af visse affaldstyper. En systematisk analyse og kvantificering af disse sideeffekter er ikke en del af denne rapport. Det er derfor vigtigt, at der foretages en samlet konsekvensanalyse, hvor disse elementer inddrages, inden man beslutter sig for at implementere de beskrevne strategier og teknologiske løsninger i praksis.

Summary

This report presents the status of the global phosphorus resources and investigates different options in relation to improving the utilisation of national phosphorus resources and thus reducing the consumption and emissions of phosphorus to the environment. This can be achieved by, among other initiatives, ensuring a better distribution of phosphorus at national level and optimising the utilisation of phosphorus resources in wastewater sludge and food waste in order to limit the purchase of commercial fertiliser. A reduction of phosphorus excretion from livestock to diminish the phosphorus content in farmyard manure is another way forward.

Global phosphorus resources

Raw phosphate has been mined for the production of mineral phosphorous fertiliser and feed phosphate for livestock for many years. EU's import of raw phosphate comes mainly from North Africa, Russia and the Middle East, which makes EU dependent on import from a relatively few producing regions, which in the long term could pose a strategic, i.e. a (commercial) threat. Today, there is no shortage of phosphorus at global level, but the concentration of phosphate production in a relatively few countries can potentially lead to shortage due to economic or political/strategic crises.

The known global phosphorus reserves comprise approximately 71 Gt with a world production of raw phosphate of about 0.2 Gt a year. In addition, there are large phosphorus resources, which today are not financially viable (i.e. too expensive considering the current trading prices), in among other countries. Saudi Arabia, the United States, Estonia, Kazakhstan and Peru. It is therefore likely that potential scarcity of raw phosphate on the global market will occur because of economic or political reasons rather than a real shortage of raw phosphate.

Redistribution of livestock manure

There is generally sufficient phosphorus in Denmark to cover the agricultural sector's current need for phosphorus for crop cultivation without import of phosphorus as commercial fertiliser.

The problem is that the available phosphorus is not evenly distributed across the country; generally, there is a surplus in Jutland where there are many large livestock farms, while there is a deficit east of the Great Belt where the farms are dominated by crop production. Therefore, concentration of phosphorus in livestock manure is important in order to reduce the costs of transporting phosphorus from Jutland to Zealand and Funen.

Transport of phosphorus in slurry over long distances is cheaper if the solid-part of the slurry, where a very large proportion of phosphorus is found, is separated from the liquid part. This improves the possibilities for transport of the solid, and most phosphorus-rich, part over long distances. The liquid part, which is rich in nitrogen, can be used locally.

There is a wide range of technical solutions to separating the solid part from the slurry – from simple presses and centrifuges to more advanced methods

such as membrane technique, evaporation, ultrafiltration and reverse osmosis. At present, only the simple methods provide an economic incentive that makes separation attractive, and it requires treatment of large volumes of manure. In this context, biogas plants play an important role in relation to the concentration of phosphorus from the livestock manure.

Phosphorus resources in wastewater sludge and food waste

Livestock manure contains 80% of the potential Danish phosphorus resource, i.e. without considering commercial fertiliser. The remaining 20% comes from a number of minor sources where wastewater sludge and SSOW (source separated organic waste) constitute almost 18 out of the 20%. The other minor sources will not be discussed further here, but they may be of great local significance. As for livestock manure, there are different methods for utilising phosphorus in wastewater, sewage sludge and ash from sludge incineration. Common to these methods is that the costs per kg of phosphorus for sewage sludge cannot compete with phosphorus from commercial fertiliser, just as there is no willingness to pay for the nutrient value of the products at the present time.

Phosphorus value chains and recycling of phosphorus

If the use of commercial fertiliser should be replaced with phosphorus from, for instance, livestock manure or sewage sludge, the costs associated with the use of the various fertiliser types are essential.

Direct application of untreated liquid manure, degassed biomass or poultry manure provides a significant financial gain in relation to the use of phosphorus in commercial fertiliser due to the simultaneous supply of other nutrients. Regarding liquid fertiliser, local use (< 20 km) is required, while poultry manure can be transported over relatively long distances and still remain an inexpensive alternative to the use of commercial fertiliser due to the high dry matter content of poultry manure.

If the slurry is to be transported over long distances (e.g., 100 km), it is necessary to separate the slurry into solid and liquid fractions in order to reduce the costs of transport. However, the value of the nutrients does not offset the costs of separation and transport, and commercial fertiliser will therefore be a cheaper alternative.

As is the case with livestock manure, direct application of wastewater sludge is a possible way of recycling phosphorus to agricultural land. Today, approx. two thirds are applied directly even though the wastewater sludge has a negative market value when doing so. In addition, the sludge can be digested (in biogas plants), either separately or together with other organic matter (such as organic household waste), or mineralised (in planted tanks). In addition, struvite (magnesium ammonium phosphate) can be precipitated as a fertiliser product from sewage water or the sludge may be incinerated, after which the ash is processed to a phosphorus fertiliser. For struvite, and a few of the methods for processing of ash, some are commercialised or approaching market maturity. These technologies are able to supply end products that meet the quality requirements (especially regarding the heavy metal content) in the Waste to Soil Order (Statutory Order on Sludge) and the Bioash Order.

Reduction of phosphorus excretion from livestock

Livestock manure contains the vast majority of the Danish phosphorus amount, corresponding to about 80% of the total available phosphorus used for crop production. The phosphorus input to farmland can therefore be diminished by reducing the amount of phosphorus that livestock excrete in the manure. Over the years, livestock excretion of phosphorus has been reduced markedly through reduced feed consumption (improved feed efficiency) and through changes of the feed by use of, for instance, phytases to replace the feed phosphates. The possibilities of decreasing the excretion of phosphorus by livestock are not fully exhausted, although the potential differs greatly for the various livestock species. Overall, the possibilities of reduction are mainly associated with two factors:

- (i) increased digestibility of phosphorus in the livestock feed.
- (ii) improved adaptation of the feed's content of digestible phosphorus to the actual need and genetic potential of the animals.

Some livestock holdings are challenged as to the relationship between nitrogen and phosphorus (N:P relation) in the livestock manure; especially in pig and poultry production this ratio is very low, while others are challenged by a high content of phosphorus in feed and crops. Most farms are also challenged by the demand for increased use of alternatives to soybean meal as a protein source since these often have a relatively higher phosphorus content than soy. This requires solid knowledge of the various initiatives before turning the potentials to practice.

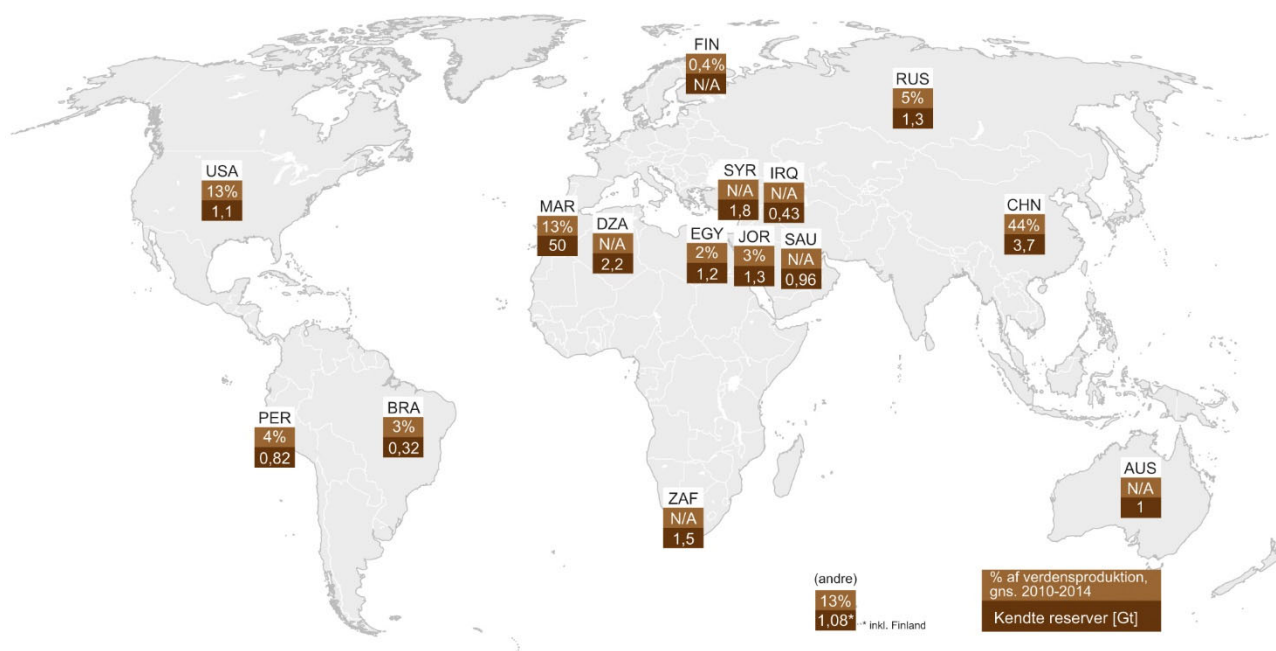
Side effects of measures

Several of the strategies and technological solutions for recycling and use of phosphorus that are mentioned in this report may have a number of negative side effects in relation to, for example, climate and environment. This applies, for instance, to the production of biogas and composting of waste that can result in emission of ammonia and nitrous oxide. Also, there may be challenges in relation to the concentration of heavy metals by recycling of certain types of waste. A systematic analysis and quantification of these side effects are not part of this report. It is therefore important that an overall impact assessment including these elements is made prior to implementing the described strategies and technological solutions in practice.

1. Fosfor som ressource

1.1 Udvinning og reserver af fosfor

Verdensmarkedet for råfosfat omfatter ca. 217 Mt årligt. Reserverne er koncentreret i få lande uden for Europa, primært i Marokko (50 Gt, 73 % af de kendte verdensreserver), mens den højeste produktion af råfosfat (44 % af verdensproduktion) er i Kina (Figur 1.1).



Figur 1.1. Fordeling [%] af råfosfat-verdensproduktion og kendte P-reserver [Gt] (European Commission, 2017). N/A: Ukendt.

Indenfor EU producerer Finland ca. 900 kt råfosfat årligt ifølge Europakommissionens rapport om kritiske råstoffer (Europakommissionen, 2017), mens EU's årsimport af råfosfat på ca. 6 Mt viser de største kendte globale fosforreserver fordelt på lande. De resterende lande har mindre fosforreserver og er derfor slået sammen i kategorien "andre". De eksisterende data om fosforreserver er generelt usikre og ufuldstændige.

1.2 Forventet udvikling i globalt forbrug af mineralsk P

Det er estimeret, at landbrugets forbrug af mineralsk fosfor (P) falder i Europa og Asien, mens det vil stige i Afrika og på globalt plan (Scholz et al., 2014). Estimerne er baseret på en fremtidig tilførsel på ca. 10 kg P/ha/år på lang sigt i Europa, mens stigningen i det afrikanske fosforforbrug afspejler det nuværende fosforunderskud og en forventet stigende fosforefterspørgsel i Afrika, indtil en tilsvarende balance på 10 kg P/ha/år er nået. I Asien er fosforforbruget steget konstant siden 1970'erne, og her forventes et fald i fosforanvendelsen i den nærmeste fremtid pga. et opstående fosforoverskud, da tilførslen har været konstant stigende op til 2010. Den generelle antagelse om en langsigtet europæisk balance på ca. 10 kg P/år vurderes at være forsimplet og må derfor vurderes nærmere for de enkelte regioner/lande på baggrund af bl.a. historikken for tilførslen af fosfor med handelsgødning, husdyrgødning mv.

EU's import af råfosfat kommer hovedsageligt fra Nordafrika, Rusland og Mellemøsten, hvilket i høj grad gør EU afhængig af få producerende regioner. Dette kan på lang sigt udgøre en strategisk trussel. Der er pt. ingen mangel på fosfor på globalt plan, men koncentrationen af fosfatproduktionen i forholdsvis få lande kan potentielt føre til mangelsituationer som følge af økonomiske eller politiske / strategiske kriser (se fx Scholz et al., 2014; Elser & Bennett 2011; Cordell & Neset 2014).

1.3 Usikkerheder forbundet med "peak phosphorus"

Der er usikkerhed om, hvorvidt "peak phosphorus", dvs. det punkt, hvor produktionen af mineralsk fosfor når det højeste mulige niveau og derefter falder, vil finde sted inden for de kommende årtier (se fx Cordell et al., 2009; Scholz et al., 2014). Fremtidig produktion afhænger af prisudviklingen, som påvirker, i hvilken grad ikke aktuelt rentable fosforressourcer bliver til rentable reserver.

Scholz et al. (2014) henviser til, at de kendte globale fosforreserver på 71 Gt, sammenlignet med en årlig efterspørgsel på 0,2 Gt/år, er tilstrækkelige i de næste årtier. Derudover er der store forekomster af råfosfat i bl.a. Saudi-Arabien, USA, Peru, Kasakhstan og Estland, hvor udvinding i dag er vurderet som økonomisk urentabel. Det er derfor mere sandsynligt, at en fremtidig knaphed på råfosfat vil opstå af økonomiske eller politiske årsager end reel mangel på råfosfat. Utilstrækkelig recirkulering af antropogene fosforstrømme kan også være en medvirkende årsag (Cordell et al., 2009).

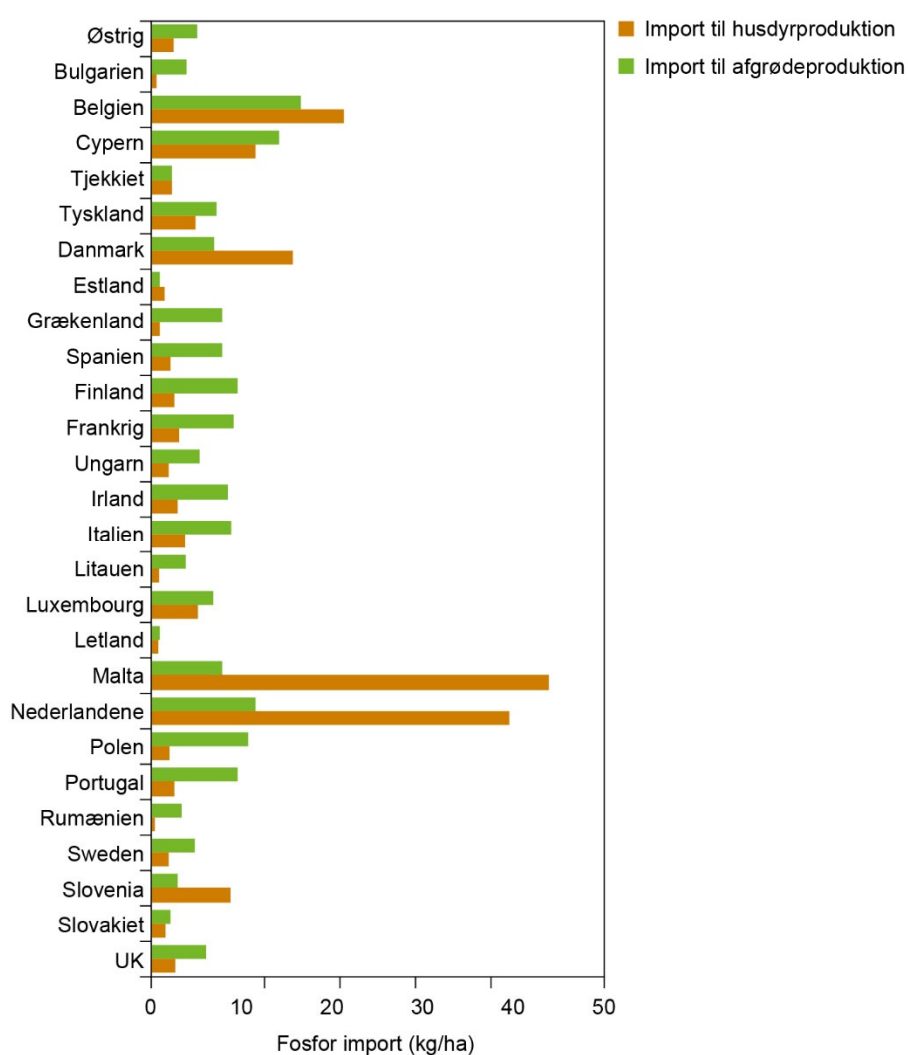
1.4 Fosforforbruget i EU 27

På europæisk plan udgør fosfor fra kunstgødning 58 % af den samlede import af mineralsk fosfor og dermed størstedelen (van Dijk et al., 2015). Uorganiske tilsætningsstoffer (foderfosfater) til husdyrfoder udgør 18 % af den totale import, mens resten bliver importeret som tilsætningsstoffer ved forarbejdningen af fødevarer (14 %) og til fremstilling af detergenter (9 %). For hele EU består ca. halvdelen af fosforimporten til husdyrproduktionen (foder) af råfosfat (baseret på udvundet mineralsk P) og resten er foderstoffer, mens 99 % af fosforen importeret til gødningsformål er primær fosfor (van Dijk et al., 2015).

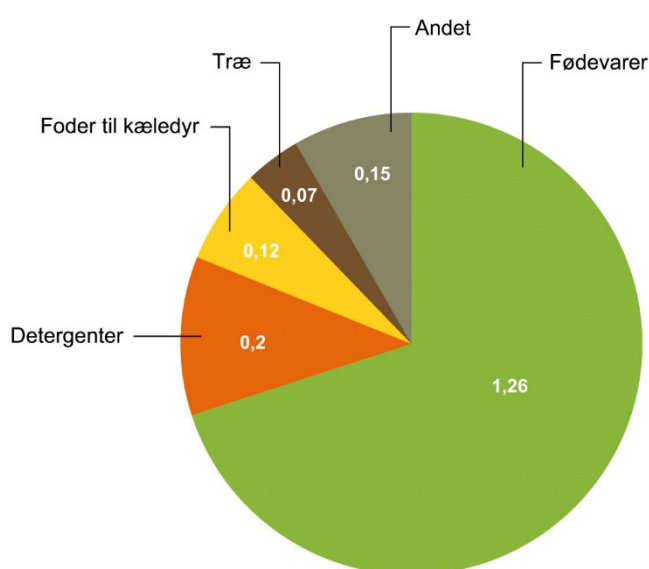
I Danmark importeres fosfor primært i form af foderstoffer (som fx soja) og foderfosfat til husdyr (Klinglmair et al., 2015; van Dijk et al., 2015). Dette er usædvanligt i europæisk sammenhæng, hvor fosforimporten i langt de fleste lande er domineret af handelsgødning (figur 1.2). Kun få EU-lande viser et højere forhold mellem import af fodermidler og gødning. I Danmark skyldes dette hovedsageligt den intensive husdyrproduktion, kombineret med fokus på at effektivisere håndteringen og anvendelse af husdyrgødning.

Samlet set står landbrugssektoren i Danmark for 80-85 % af den samlede fosforimport (Klinglmair et al., 2015). Den resterende mængde fordeler sig på forbrugssektoren, hvor fosfor i fødevarer udgør ca. 70 % af det totale fosforforbrug pr. indbygger. Resten er hovedsageligt sammensat af detergenter (ca. 10 %), foder til kæledyr (ca. 6 %), træ (ca. 4 %), og forskellige mindre fraktioner (figur 1.3; van Dijk et al., 2015).

Figur 1.2. Sammenligning af fosforimport til produktion af afgrøder (handelsgødning) og husdyrproduktion (foder og tilsætningsstoffer) til EU-27 i 2005 i kg pr. hektar landbrugsareal (efter van Dijk et al., 2015).



Figur 1.3. Opdeling i fosforforbruget i den danske forbrugssektor [kg pr. indbygger pr. år] (efter van Dijk et al., 2015).



1.5 Fosforkilder i Danmark med potentiale for genanvendelse inkl. husdyrgødning og affald

I 2015 stammede størstedelen af det fosfor, der blev tilført landbrugsjorden fra husdyrgødning (46,1 kt P) efterfulgt af fosfor fra handelsgødning (13,3 kt P), fra slam (2,4 kt P) og industriaffald (3,1 kt; Blicher-Mathiesen et al., 2016). Der er en markant skævhed i den producerede mængde husdyrgødning i Danmark, da husdyrproduktionen som nævnt er koncentreret i den vestlige del af landet, mens planteavlsbrug, hvor der kan være et underskud på fosfor, er koncentreret i de østlige landsdele (se fx Klinglmair et al., 2015; Jensen et al., 2015). En måde at reducere fosforoverskuddet på er at begrænse mængden af handelsgødning. Men i områder, hvor fosforoverskuddet stammer fra husdyrgødning, er mulighederne for at reducere tilførslen af fosfor gennem handelsgødning begrænset, da der ikke bliver brugt meget handelsgødning i forvejen (Schoumans et al., 2015). Hvis man med rimelige omkostninger kunne behandle, transportere og tilføre husdyrgødningsfosfor til de jorde (i Østdanmark), hvor der er behov for fosfor, og hvor der i dag primært anvendes handelsgødningsfosfor, findes der derfor et stort potentiale for en betydelig bedre udnyttelse af den mængde fosfor, der findes i husdyrgødning. Det kræver dog, at udfordringerne omkring behandlingsteknologier og transport løses (se afsnit 2).

Spildevandsslam udgør ca. 5 kt P / år, hvoraf ca. 65 % bliver spredt direkte på landbrugsjord (Miljøstyrelsen, 2017). Det betyder, at der er et potentiale på ca. 1,7-1,8 kt P, som pt. ikke bliver udnyttet i jordbruget.

Ved genanvendelse af fosfor fra bioaffaldsfraktionen i dagrenovation er der et potentiale på højst ca. 1,6 kt P / året, som ikke bliver udnyttet endnu. Den totale mængde fosfor i denne fraktion svarer dermed til ca. 12 % af den importerede mængde fosfor i handelsgødning i 2011 (Klinglmair et al., 2015).

2. Fosforværdikæder fra husdyrgødning og bioaffald

2.1 Husdyrgødning

2.1.1 Traditionel håndtering af husdyrgødning

Anvendelsen af husdyrgødning, herunder afgasset og forarbejdet husdyrgødning, er reguleret med ophæng i bl.a. husdyrbrugsloven (Bekendtgørelse nr. 1020 af 06/07/2018 om husdyrbrug og anvendelse af gødning m.v.) og gødskningsloven (Bekendtgørelse nr. 996 af 25/06/2018 om jordbrugets anvendelse af gødning og om plantedække). Den væsentligste direkte regulering af fosfor findes i husdyrgødningsbekendtgørelsen (Bekendtgørelse nr. 1076 af 28/08/2018 om erhvervsmæssigt dyrehold, husdyrgødning, ensilage m.v.). Husdyrgødningsbekendtgørelsen stiller krav om, hvor stort et harmoniareal en bedrift skal råde over for at kunne udbringe en given mængde husdyrgødning. Den maksimale mængde husdyrgødning, der kan udbringes pr. hektar (ha), afhænger bl.a. af husdyrtypen, som husdyrgødningen kommer fra.

Indtil 2017 var de maksimale mængder gødning, der kunne anvendes pr. ha, opgjort i såkaldte dyreenheder (DE), men fra 2017 er de angivet i kg kvælstof (N) og fosfor (P). Der var frem til 2017 fastsat et skærpet harmonikrav på 1,4 dyreenheder pr. hektar harmoniareal, svarende til 140 kg N pr. ha, men udtrykket dyreenheder anvendes ikke længere i reguleringen. Ved anvendelse af organisk gødning er der et udnyttelseskrav angivet i procent for kvælstof. Udnyttelsesprocenten bestemmer den kvælstofdel, som en given mængde organisk gødning indgår med i det samlede gødskningsregnskab over forbrug af kvælstof på bedriften. Udnyttelsesprocenten hænger sammen med, at en del af kvælstoffet i organisk gødning er organisk bundet og derfor ikke umiddelbart tilgængeligt for planterne. Denne del frigives først over tid gennem mineraliseringsprocesser i jorden. Det fastsatte udnyttelseskrav svarer som udgangspunkt til den del af kvælstofindholdet, som er umiddelbart tilgængelig for planterne. Hver afgrøde har sin egen gødningsnorm afhængig af jordtype, og det er på baggrund af de dyrkede afgrøder og deres normer, at en bedrifts samlede kvælstofkvote beregnes. Harmonikravet afgør, hvor stor en del af kvælstofkvoten der kan udgøres af organisk gødning.

Frem til ophævelsen af harmonikravet til 170 kg N pr. hektar i 2017 udgjorde det skærpede harmonikrav en indirekte regulering af anvendelsen af fosfor i husdyrgødning. Med hævelsen af harmonikravet fra 1. august 2017 er der indført en ny direkte fosforregulering i form af fosforlofter for forskellige gødningstyper, som det fremgår af tabel 2.1. Mængden af fosfor, der kan tildeles pr. ha, er endvidere afhængig af det areal, der skal udbringes gødning på, idet der for ca. 22 % af landbrugsarealet i Danmark er indført skærpede fosforlofter. Her kan der udbringes mindre fosfor pr. ha end ved de generelle fosforlofter. Fosforreguleringen indføres over en 8-årig periode med gradvist skærpede fosforlofter for visse gødningstyper. I 2022 skal der igen tages stilling til niveauet af fosforlofterne for de enkelte gødningstyper, mens det gennemsnitlige beskyttelsesniveau er fastlagt og skærpes frem til 2025, således at man i 2025 når ned under det niveau, der var gældende før ophævelsen af harmonikravet i 2017.

Tabel 2.1. Maksimal fosfortilførsel (kg P/ha) med gødning indført i 2017. Der gælder generelle lofter på 78 % af landbrugsarealet (G) og skærpede lofter i oplande til søer svarende til 22 % af landbrugsarealet (S). For 2022 og 2025 er kun det gennemsnitlige beskyttelsesniveau blevet fastlagt. Fosfortilførsel og fosforlofter beregnes som et gennemsnit pr. bedrift.

Gødningstype, kg P/ha	Før 1. august 2017	Fosforlofter fra 1. august 2017 (skærpet fra 1. august 2018)		Fosforlofter fra 1. august 2019		Fosforlofter fra 1. august 2020		Fosforlofter fra 1. august 2022		Fosforlofter fra 1. august 2025	
		G	S	G	S	G	S	G	S	G	S
	Harmonikkrav og skærpet harmonikkrav										
Fjerkræ og pelsdyr	45-55 og 43	43	30	35	30	35	30				
Slagtesvin	33,5	39	30	39	30	35	30				
Søer og smågrise	34 og 37	35	30	35	30	35	30				
Kvæg, får og geder	27 for kvæg	30	30	30	30	30	30				
Kvæg omfattet af kvægundtagelsen (230 kg N/ha)	36	35	35	35	35	35	35				
Organisk affald og handelsgødning	30	30	30	30	30	30	30				
Gennemsnitligt beskyttelsesniveau (kun for husdyrgødning)	Inkl. Pklasser 32,2	34,7 kg P/ha (fra 2018)		34,1 P/ha		33,2 kg P/ha		32-33 kg P/ha		30-31 kg P/ha	

Den komplette tabel fra lovforslaget findes i forarbejderne til husdyrloven. https://www.ft.dk/ripdf/samling/20161/lov-forslag/l114/20161_l114_som_fremsat.pdf

Hovedparten af husdyrgødningen anvendes i dag direkte som gødning uden forudgående behandling (>80 %), men en stigende andel anvendes i biogasanlæg forud for udbringning på marker. En mindre del separeres i en flydende og en fast del, men dette udgør stadig under 1 % af husdyrgødningen, og oftest har gødningen været omsat i biogasanlæg inden. I dag sker separation kun på få anlæg, og det eneste sted, hvor det sker på en stor mængde gødning, er ved Måbjerg Bioenergi, hvor separationen er en betingelse i anlæggets miljøgodkendelse. Fosforindholdet i returproduktet fra biogasanlæg udregnes som et vægtet gennemsnit ud fra sammensætningen af den biomasse og de tilhørende fosforlofter, der er leveret ind til biogasanlægget. I forhold til fosforreguleringen er det generelle fosforloft for den afgassede biomasse baseret på et sådant vægtet gennemsnit, mens det skærpede fosforloft i oplande til visse søer er fastsat til 30 kg fosfor pr. ha både i 2018 og fremadrettet uanset gødningstypen (dog gælder der fortsat et loft på 35 kg fosfor pr. ha for kvægundtagelsesbrug).

2.1.2 Behandlingsteknologier

Der findes et stort antal teknikker til ændring af husdyrgødningens næringsstofsammensætning og adskillelse i flere forskellige fraktioner med forskelligt indhold af næringsstoffer (Burton & Turner, 2003). Omkostningerne til transport af næringsstoffer som fosfor kan reduceres ved separation og opkoncentrering af fosfor i den ene fraktion og kan derved muliggøre øget omfordeling af overskudsfosfor mellem bedrifter. Metoderne til behandling af husdyrgødning anvendes oftest med henblik på opkoncentrering af fosfor og kvælstof eller for at fjerne kvælstof ved nitrifikation og denitrifikation (det sidste er ikke brugt i DK). Sedimentation, mekaniske separatorer og centrifugering er

de mest enkle teknikker med de laveste omkostninger, mens biologiske behandlinger, fordampning, ultrafiltrering og omvendt osmose er komplekse og omkostningstunge teknikker (Burton & Turner, 2003). Separationseffektivitet kan defineres som teknikkens kapacitet til at adskille næringsstoffer i næringsrige fraktioner og fraktioner med lavt indhold af næringsstoffer, der kan anvendes lokalt. Den samlede mængde næringsstoffer i de næringsrige fraktioner og forholdet mellem mængderne af næringsstoffer i det faste stof og de flydende fraktioner bør overvejes, når man vurderer separationseffektiviteten (Møller et al., 2000). De fleste separationsmetoder kan anvendes på ubehandlet flydende husdyrgødning og afgasset biomasse.

De vigtigste behandlingsteknikker kan opdeles i følgende hovedgrupper:

1. Biologiske metoder
2. Mekanisk separation
3. Dekantercentrifugering
4. Membran teknologi
5. Inddampning
6. Sedimentering
7. Kemisk behandling.

Biologiske metoder

De mest udbredte biologiske metoder til behandling af husdyrgødning er bi- oforgasning. Biogasprocessen i sig selv har ikke nogen indflydelse på det totale fosforindhold, men næringsstofsammensætningen i den afgassede biomasse vil afspejle næringsstofindholdet i de forskellige husdyrgødningstyper og biomasser, der sammenblandes på biogasanlægget. Dette beskrives nærmere i afsnittet om biogasanlæggenes rolle (afsnit 2.1.3). I visse andre lande anvendes også beluftning med efterfølgende nitrifikation / denitrifikation, hvorved der tabes kvælstof, mens beluftning ikke har nogen indflydelse på fosforindholdet. Metoden forventes ikke at vinde indpas i Danmark, da teknologien vil have nogle negative miljømæssige konsekvenser, eftersom kvælstoffet vil blive tabt i form af frit kvælstof og lattergas. Beluftning vil derfor ikke blive belyst yderligere.

Mekanisk separation

Der findes en hel række simple teknikker, der er karakteriseret ved, at gyllen sigtes gennem en hulstørrelse på 0,5-3 mm. Sigtningen i sig selv giver en fast fraktion med et forholdsvis lavt tørstofindhold, og der er derfor oftest et behov for en yderligere afvanding ved hjælp af mekanisk presning. De mest udbredte mekaniske presse-teknologier består af skrue- og sibåndspresse. Skruerpresser og sibåndspreser kan fungere uden indledende sigtning, men kapaciteten er lidt lavere.

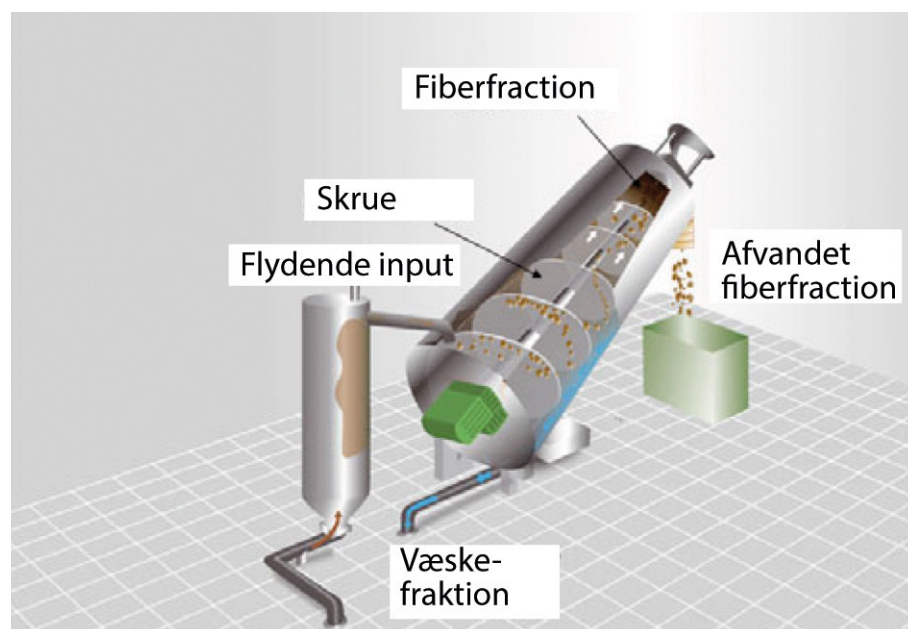
Effektiviteten af mekanisk separation afhænger af gylletypen og øges med stigende tørstofindhold, men opkoncentreringen af næringsstoffer er oftest beskeden. Ved at kombinere visse af de simple teknikker med kemisk fældning kan der opnås en høj effektivitet.

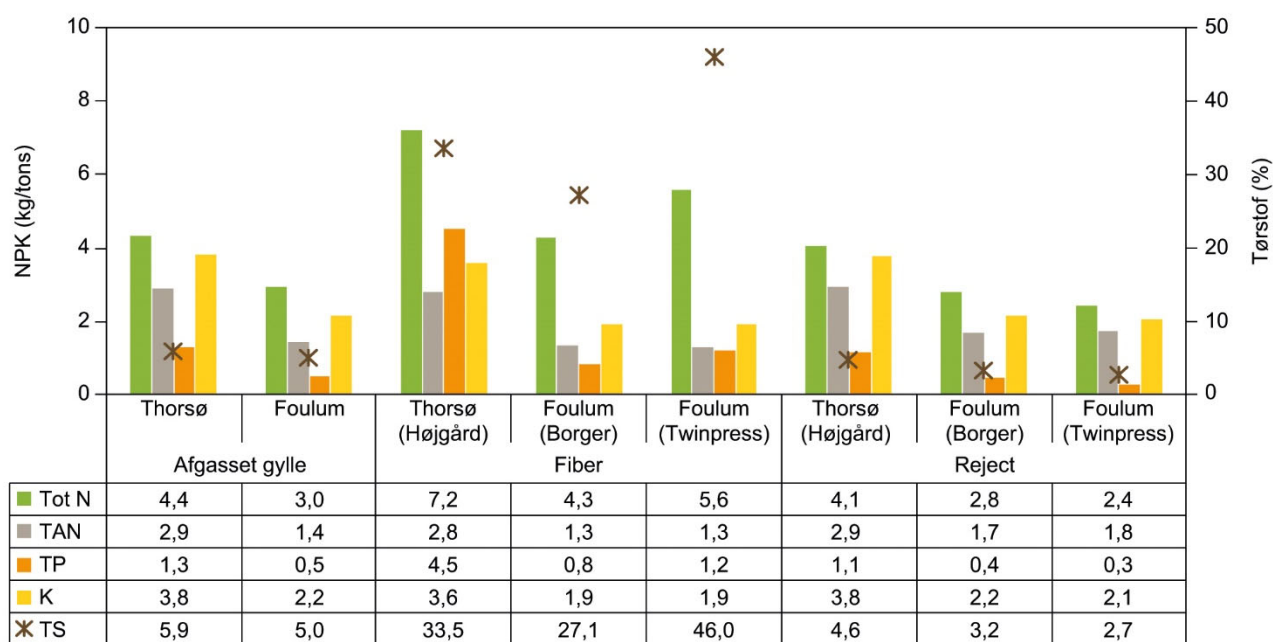
Effektiviteten på opkoncentreringen af næringsstoffer med de simple, mekaniske separatorer som buesigter, skruerpresser m.m. er begrænset, typisk mindre end 15 % for fosfor og 9 % for kvælstof, og effektiviteten er meget afhængig af tørstofindholdet i gyllen.

Energiforbruget ved anvendelse af skruepresser og andre simple teknikker er lavt, typisk 0,5 kwh/ton gylle.

Der anvendes i dag skruepresser på flere danske biogasanlæg. I Figur 2.1 er næringsstofindholdet i de forskellige fraktioner fra to forsøg, der er gennemført i Thorsø (Møller, 2018) og Foulum (Frandsen, 2018) ved anvendelse af skruepresse, illustreret. I forsøget er fiberen fra skruepresseren yderligere afvandet med en Twin-skruepresse, der presser ekstra vand ud af fiberen. Det fremgår, at koncentrationen af næringsstoffer i fiberen varierer mellem de to anlæg, og det vurderes, at den væsentligste årsag er, at indholdet i den afgangsgylle, der separeres, er meget forskellig for de to anlæg. Noget af forskellen kan imidlertid skyldes, at det er forskellige fabrikater af udstyr, der anvendes. Anvendelse af en Twin-skruepresse muliggør, at tørstofandelen i fiberfraktionen kan øges fra 27 % til 46 %, samtidig med at fosforkoncentrationen øges med ca. 50 %. Twin-presseren er udelukkende testet på fiberfraktion fra skruepresse, men det må formodes, at tilsvarende effekter ville kunne opnås på fiberfraktionen fra en dekantercentrifuge.

Figur 2.1. Skruepresser (Hjorth et al., 2007)





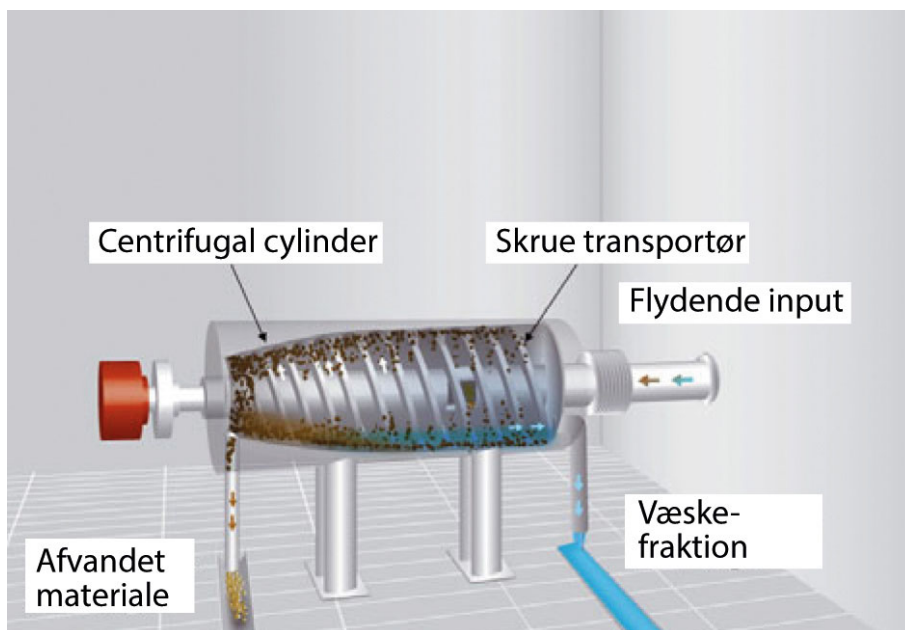
Figur 2.2. Koncentrationer af total kvælstof (Tot N), ammonium kvælstof (TAN), total fosfor (TP) og tørstof (TS) målt i afgasset gylle, fiber- og væskefraktion (reject) i to separationsforsøg gennemført på hhv. Thorsø og Foulum biogasanlæg. På Foulum biogasanlæg blev der anvendt en Börger-skruepresse, mens der i Thorsø blev anvendt en Visscher-skruepresse (0,25-0,50 mm sigtestørrelse).

Dekantercentrifugering

Dekantercentrifugering virker ved, at gylle udsættes for en stor centrifugalkraft i en tromle, der roterer med høj hastighed, typisk 3-4000 rpm, hvorved gyllens partikler sedimenterer i tromlens periferi og løbende kan fjernes med en roterende skrue (figur 2.3). En dekantercentrifuge producerer en tørstofrig fraktion, der indeholder størstedelen af gyllens fosfor, organisk kvælstof, svovl m.m., og en væskefraktion, der indeholder størstedelen af gyllens ammoniumkvælstof og kalium (se afsnit 3, Optimering af fodringen af husdyr). Dekantercentrifugen er en velafprøvet teknik, der i mange år har været anvendt til spildevandsrensning både i industrien og på kommunale rensningsanlæg, og der er de seneste år også opnået en del erfaring med centrifugering af gylle. Det er ligeledes muligt at anvende mobile dekantercentrifuger, som betjener flere landbrug, hvorved behandlingsudgiften for de mindre brug kan reduceres. Der er en del erfaringer i Holland med anvendelse af mobile dekantercentrifuger, ligesom der er kørt forsøg i Danmark (Sørensen & Møller, 2006).

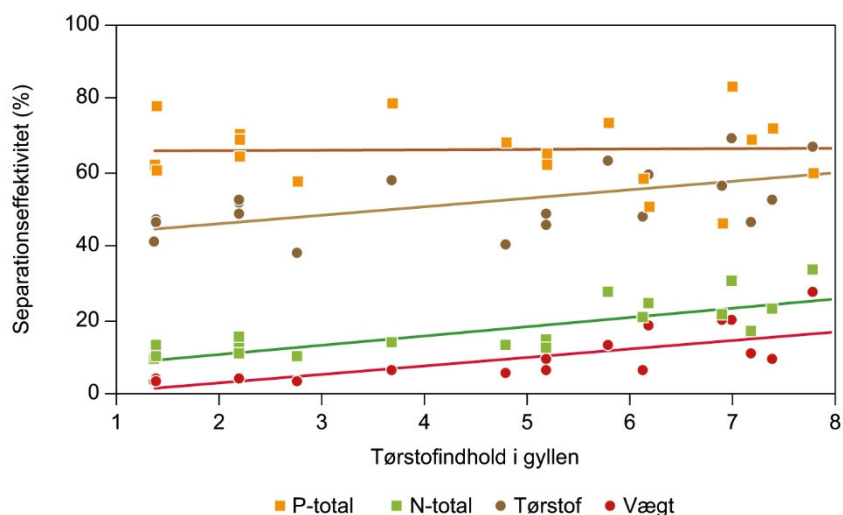
Omkostningen ved anvendelse af en dekantercentrifuge afhænger af mængden af behandlet gylle, og der skal behandles store mængder gylle for at udnytte kapaciteten og reducere udgiften pr. behandlet enhed. Dette indebærer, at behandlingsudgiften på små og mellemstore brug vil være stor. Energiforbruget ved anvendelse af en dekantercentrifuge er beskedent, typisk 3 kWh/ton gylle.

Figur 2.3. Dekantercentrifuge (Hjorth et al., 2007).



Effektiviteten på opkoncentreringen af næringsstoffer ved anvendelse af dekantercentrifuger afhænger af en række forhold som gylletype, tørstofindhold i gyllen, indstilling af udstyret og fabrikat. Effektiviteten ved centrifugering af forskellige gylletyper med forskellige indstillinger af dekantercentrifuger er belyst i en række studier (Sørensen & Møller, 2006; Møller et al., 2007a). Tørstofindholdet i den flydende gødning er en af de parametre, der spiller en rolle, og i figur 2.4 er separationseffektiviteten af kvælstof og fosfor illustreret. Det fremgår, at fosforseparationen over på den faste fase pt. svarer til 50-80 % af den totale mængde fosfor i gyllen (se afsnit 3, Optimering af fodringen af husdyr). Endvidere er der en forholdsvis lav sammenhæng med tørstofindholdet, mens der er en stærk korrelation mellem tørstof og kvælstofseparation.

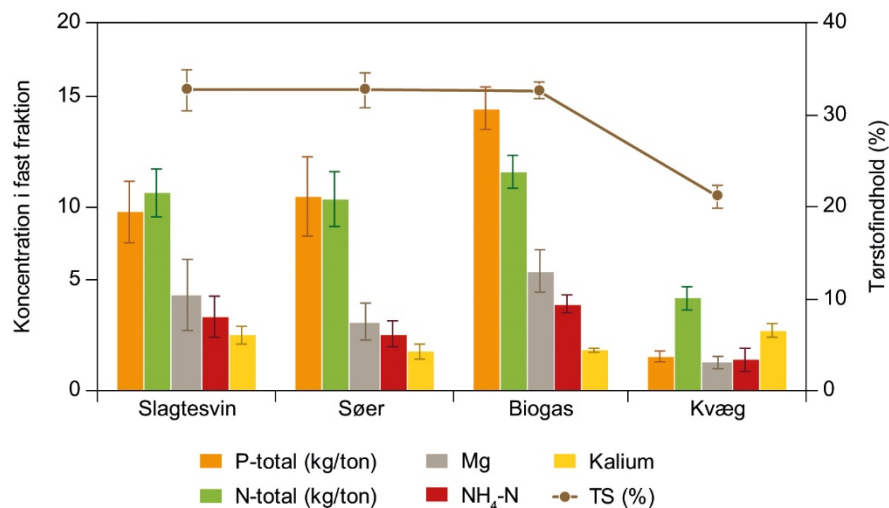
Figur 2.4. Separationseffektivitet ved anvendelse af dekantercentrifuge (Møller et al., 2007a). Separationseffektiviteten af vægt angiver mængden af den oprindelige flydende biomasse, der ender i den faste fraktion.



I forbindelse med en omfordeling af gylle er næringsstofindholdet i den faste fraktion afgørende for, hvor langt det kan betale sig at transportere den faste fraktion. I en undersøgelse gennemført af Møller et al. (2007a) er indholdet af næringsstoffer undersøgt for forskellige husdyrgødnings-kategorier. Det fremgår, at indholdet af næringsstoffer typisk er væsentligt højere i gylle, der

er behandlet i biogasanlæg i forhold til rå-gylle. Indholdet af fosfor i den faste fraktion efter separation er således hhv. 50 % og 700 % højere end i rå svine- og kvæggylle, hvilket bekræfter, at fosfor primært udskilles af husdyrene med den faste fraktion og ikke i urin-/ajlefasen (se afsnit 3, Optimering af fodringen af husdyr). Figur 2.5 viser indholdet af forskellige næringsstoffer i den faste fraktion.

Figur 2.5. Næringsstofindhold i faste fraktioner (kg/ton) ved anvendelse af dekantercentrifuge på forskellige typer gylle samt tørstofindholdet (TS) i den faste fraktion (Møller et al., 2007a).



Membran-teknologi

Membraner er i stand til at fraseparere små partikler fra en væske. Behandlingen kræver imidlertid, at de fleste større partikler er fjernet, og er således primært anvendelig som efterbehandling af en væskefraktion efter en indledende mekanisk separation. De forskellige typer membranseparation kan opdeles i ultrafiltrering, mikrofiltrering og omvendt osmose. Membranseparation kan anvendes til at adskille og opkoncentrere opløst kvælstof, fosfor og kalium til en næringsrig flydende fraktion og en næsten ren vand-fraktion.

Der har i tidernes løb været udført mange forsøg med membranteknologi, ofte i forbindelse med biogasanlæg. Den primære årsag til, at membranteknologien ikke har vundet større indpas, er en meget høj pris, et forholdsvis højt energiforbrug og tekniske udfordringer med belægninger på membranerne, der er vanskelige at fjerne og giver en kort levetid.

I forhold til opkoncentrering og omfordeling af fosfor vurderes membraner ikke at være interessante pga. den høje pris, og fordi teknologien kun er anvendelig på en forholdsvis ren væskefraktion, der i forvejen er separeret.

Inddampning

Inddampning virker ved at dampe vandet af flydende gødning enten omkring kogepunktet, der er lidt over 100° C, eller ved at afdampe under vakuum ved lavere temperatur. Inddampning udføres typisk på den flydende fraktion efter en mekanisk separation for at undgå belægninger på varmevekslere. Energiforbruget er meget højt og anslås til omkring 670 kwh/ton vand. Energiforbruget kan dog reduceres ved vakuum-inddampning og varmeveksling. I 1990'erne skete der en del udvikling på området med inddampning, og flere danske firmaer udviklede systemer, hvoraf det mest kendte var Funki Manura, der blev etableret på flere danske landbrug og eksporteret til Holland. Teknologien blev dog opgivet, og i dag er der ingen af disse anlæg i drift. Årsagen til at teknologien ikke anvendes i dag, er den meget høje pris

samt et højt energiforbrug, der ikke kan konkurrere med transport og traditionel udbringning.

I forhold til opkoncentrering af fosfor vurderes teknologien ikke at være interessant grundet den meget høje pris, og fordi hovedparten af fosforet allerede findes i tørstoffractionen ved mekanisk separation.

Sedimentering

Sedimentering er blevet anvendt til at fjerne faste stoffer fra tynd svinegylle (Ndegwa et al., 2001). Suspenderede faste stoffer (SS) har tendens til at synke under indflydelse af tyngdekraften. Store partikler synker hurtigere end fint SS og indeholder det meste af fosforet. Aflejringstiden for partikler afhænger af forskellige faktorer, og generelt er tørstokkoncentrationen af gødningen den vigtigste faktor. Det meste SS sedimenterer i løbet af den første time, og kun marginale forbedringer opnås med en opholdstid på fire timer. I undersøgelsen blev opnået fjernelse af SS på hhv. 8, 39, 62, 66 og 37 % for tørstofindhold på henholdsvis 6,0, 4,0, 2,0, 1,0 og 0,5 %. Disse data tyder på, at både for højt og for lavt indhold af tørstof i gødningen resulterer i en reduceret fjernelse af SS ved sedimentering. I denne undersøgelse gav tørstofindhold på 1,0 og 2,0 % den bedste SS-fjernelse. Den generelle tendens i disse resultater stemmer godt overens med resultaterne i en lignende undersøgelse af Moore et al. (1975). Deres sedimenteringsundersøgelse med svinegylle viste, at reduktionen af SS var henholdsvis 59, 68 og 70 % ved 0,01, 0,1, og 1,0 % TS, dvs. separationseffektiviteten faldt med faldende tørstofniveauer under 1,0 %. Martinez et al. (1995) viste lignende resultater. I deres studier blev de bedste resultater opnået med 2,5 % tørstof, mens mere end 4,0 % tørstof ikke gav en effektiv sedimentation.

Under danske forhold, hvor der generelt tilstræbes et højt tørstofindhold i husdyrgødning, vurderes sedimentation ikke at kunne spille en væsentlig rolle i forhold til fosforseparation og omfordeling.

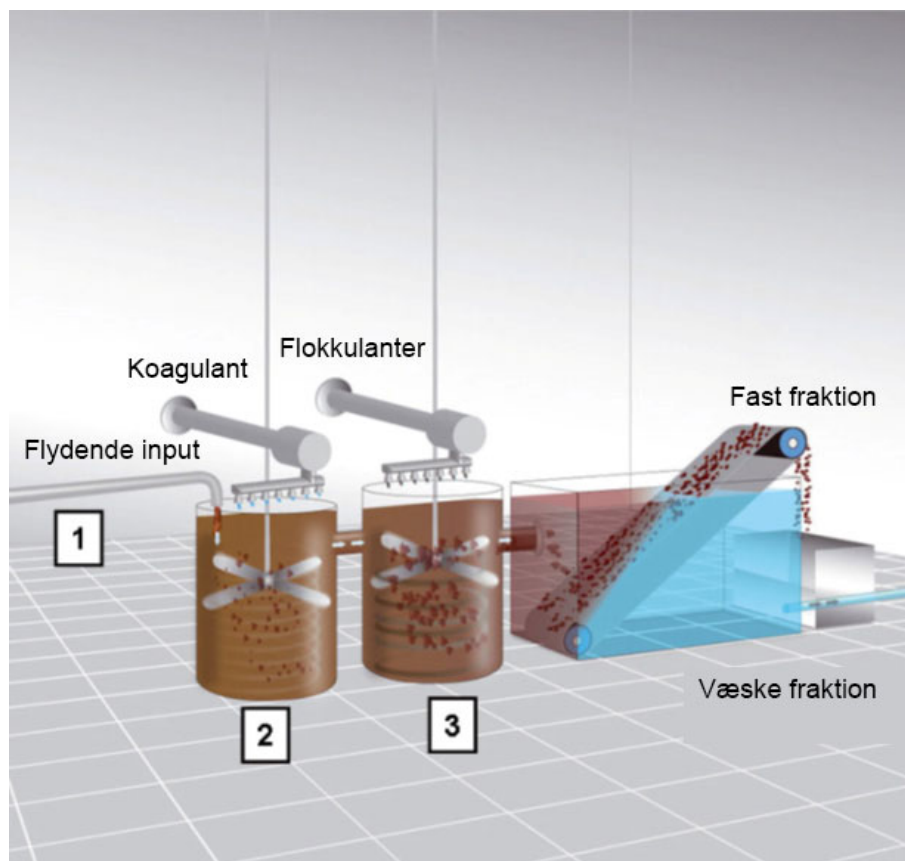
Kemisk fældning

Kemiske tilsætningsstoffer til forbedring af separationseffektiviteten kan anvendes til gylle. Metoden er kendt og almindelig til rensning af kommunalt og industrielt spildevand. Kemisk fældning opnås ved tilsætning af kemikalier, der ændrer partiklernes tilstand, hvorved det bliver muligt at fraseparere en større andel.

De hyppigst anvendte kemikalier til fosforseparation er aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), jernklorid (FeCl_3), jernsulfat ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) og læsket kalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Kemikalierne får partiklerne til at koagulere, og for yderligere at sammenhæfte de dannede kolloider i større flokke/aggregater tilsættes der ofte en polymer. Tørstoffet koagulerer og flokkulerer i et eller flere proceskamre og fjernes og afvandes efterfølgende med en sibåndspresse (figur 2.6).

Effektiviteten på opkoncentreringen af næringsstoffer ved kemisk fældning er høj for fosfor (89 %) og organisk kvælstof, men beskeden for totalkvælstof (<40 %). Kemisk fældning bliver anvendt på ubehandlet gylle i Danmark, men da omkostningen er meget høj ved anvendelse til afgasset biomasse pga. højt forbrug af kemikalier, vurderes den ikke at komme til at spille en rolle i forbindelse med biogas. Der er endvidere diskussion om, hvorvidt polymerer kan have en skadelig effekt på miljøet, men da det ikke forventes anvendt i større stil, vil det ikke blive beskrevet yderligere.

Figur 2.6. Kemisk fældning
(Hjorth et al., 2007)



Afbrænding af fast husdyrgødning

Ved afbrænding eller termisk forgasning af den faste fraktion af separeret gødning eller af fast husdyrgødning kan der opnås en yderligere opkoncentrering af fosfor i en askefraktion (Kuligowski et al., 2010). Dette kan yderligere reducere transportomkostningerne pr. kg fosfor. Ved denne behandling tabes en stor del af kvælstofindholdet til luften, men samtidigt kan der være en energigevinst. Det er dog langt fra alt det fosfor, der opkoncentreres i asken ved afbrænding eller forgasning af husdyrgødningen, der efterfølgende kan optages af planter og dyr. Plantetilgængeligheden af fosfor i aske fra forbrænding og forgasning af husdyrgødning er således omtrent på niveau med den ubehandlede gødning (Kuligowski et al., 2010). Et pilotstudie med grise viste ligeledes, at fordøjeligheden af fosfor i den samme aske, som er anvendt i ovennævnte forsøg med planter, var relativt lav (50%) og lå på niveau med foderfosfattyphen Ca-Na-fosfat, som normalt ikke bruges som tilsætningsstof i dansk husdyrproduktion (se afsnit 3.4.4). Det betyder, at aske fra forbrænding og forgasning af husdyrgødning formentlig først vil skulle efterbehandles og lukkes op med fx syre, hvis fordøjeligheden af fosfor skal være på højde med de mest anvendte foderfosfattyper (se afsnit 3.4.4).

Afbrænding og termisk forgasning af husdyrgødning anvendes i dag stort set ikke i Danmark, men der er en interesse fra erhvervets side, nok især i forbindelse med fjerkræproduktion. En af grundene til, at det ikke har været anvendt, er omkostningstunge krav om kontrol af røggasemissioner fra behandlingsanlæg. I bl.a. Holland og England findes store anlæg til afbrænding af fjerkrægødning. Ved afbrænding af husdyrgødning, fx fjerkrægødning, skal man ligeledes være opmærksom på, at andre mineralstoffer som fx zink, kobber og tungmetaller også opkoncentreres sammen med fosfor i asken.

Økonomi ved anvendelse af separeringsteknologi

Omkostningerne til separation afhænger af en række faktorer. I forhold til fosforseparation vurderes skruepresse, dekantercentrifugering og kemisk fældning som de mest omkostningseffektive teknologier. Omkostningerne til separation ved de forskellige teknologier omfatter eludgifter, vedligeholdelsesomkostninger og kapitaludgifter. I tabel 2.2 er vist eksempler på nøgletal for separatorer, der anvendes eller har været anvendt under danske forhold.

Tabel 2.2. Økonomiske nøgletal for forskellige teknologier (¹Nissen (2018), ²Sørensen og Møller (2006)).

Teknologi	Type	Kapacitet	Strømforbrug	Forbrugsstoffer	Tidsforbrug	Investering
		Ton/time	Kwh/ton	Kr./ton	Timer/dag	Kr.
Skruepresse ¹	Borger RC50	25	0,30	0	1	250.000
	Borger RC75	75	0,24	0	3	300.000
	Borger RC150	100	0,22	0	4	450.000
Dekantercentrifuger	GEA (UCD 305)	7	3	0	1	1.000.000
	Pieralissi (Jumbo 3) ²	19	2	0	1	1.500.000
Kemisk fældning	AL2 P812 ¹	8	0,5	4	1	750.000

Grundlaget for den økonomiske analyse er masse- og energibalancer af systemerne samt kapitalomkostningerne (CAPEX) og driftsomkostninger (OPEX).

Følgende ligning er anvendt til beregning af kapitaludgifter (Møller et al., 2000:

$$Q = C * \frac{r(1+r)^n}{-1 + (1+r)^n}$$

hvor, Q er den årlige udgift, C er den samlede investering og omkostninger til anlæggets installation, r er renten fastsat til 4 %, og n er udstyrets anslåede levetid (10 år).

Tabel 2.3. Økonomiberegninger under forudsætning af 80 %'s kapacitetsudnyttelse. Eludgift er anslået til 0,6 kr/kwh og løn til 250 kr./time.

Teknologi	Type	EI	Reparation	Løn	Kapitaludgifter		Samlet
		Kr./ton	Kr./ton	Kr./ton ¹	Kr./år	Kr./ton ¹	
Skruepresse	Borger RC50	0,18	1,5	0,52	30823	0,18	2,4
	Borger RC75	0,14	1,3	0,52	36987	0,07	2,0
	Borger RC150	0,13	1,2	0,52	55481	0,08	1,9
Dekantercentrifuge	GEA (UCD305)	1,80	3	1,86	123291	2,55	9,2
	Pieralissi	1,20	3	0,69	184936	1,41	6,3
Kemisk fældning ¹	AL2 P812	0,30	2	1,63	92468	1,67	5,6

¹Kemisk fældning kan ikke anvendes på afgasset gylle, da udgiften til polymerer bliver meget høj.

Det fremgår af tabel 2.3, at omkostningerne afhænger af teknologierne og kapaciteten. Omkostningen ved anvendelse af skruepresser varierer fra 1,9-2,4 kr. / ton, og dekantercentrifuger varierer fra 6,3-9,2 kr. / ton. Kemisk fældning er beregnet til ca. 5,6 kr. / ton, men teknologien er kun anvendelig på ubehandlet gylle.

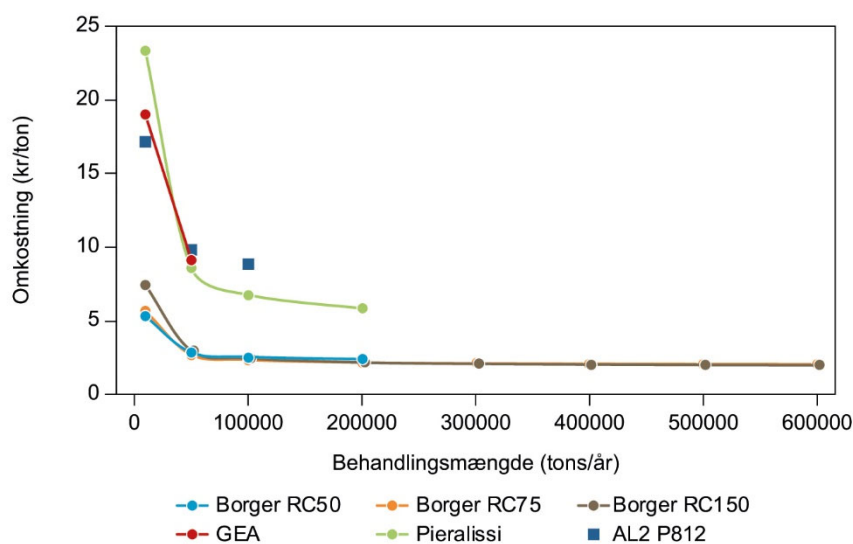
Anvendelse af skruepresse er således væsentligt billigere end andre teknologier, men til gengæld er mængden af fosfor, der frasepareres, væsentligt lavere. Hvis mængden af fosfor indregnes, bliver forskellen mellem teknologierne mindre. I tabel 2.4 er prisen pr. kg fosfor, der frasepareres beregnet, og prisen kan i bedste tilfælde nå ned på 8, 9 og 11 kr./kg P ved hhv. skruepresse, dekantercentrifuge og kemisk fældning.

Tabel 2.4. Nøgletal for fosforseparation ved et indhold på 0,81 kg P/ton, der afspejler gennemsnittet for 13 biogas anlæg (Møller og Nielsen, 2016).

Teknologi	Type	P separation		
		% P, der frasepareres	Kg P frasepareret/ton	Kr./kg P
Skruepresse	Borger RC50	30 %	0,243	10
	Borger RC75	30 %	0,243	8
	Borger RC150	30 %	0,243	8
Dekantercentrifuge	GEA	70 %	0,567	16
	Pieralissi	70 %	0,567	11
Kemisk fældning	AL2 P812	75 %	0,6075	9

Kapacitetsudnyttelsen er meget vigtig i forhold til separationsomkostningen, og der er betydelige stordriftsfordele. Ved mængder på over 50.000 tons/år falder omkostningen således betydeligt ved alle teknologier. Da det er de færreste landbrug, der har gyllemængder i denne størrelsesorden, vil der være en økonomisk fordel ved, at separationen finder sted på fællesanlæg.

Figur 2.7. Separationsomkostninger og kapacitetsudnyttelser for skruepresse (Borger) dekantercentrifuge (GEA og Pieralissi) samt kemisk fældning (AL2 p812). Baseret på nøgletal i tabel 2.4.



2.1.3 Biogasanlæggenes rolle

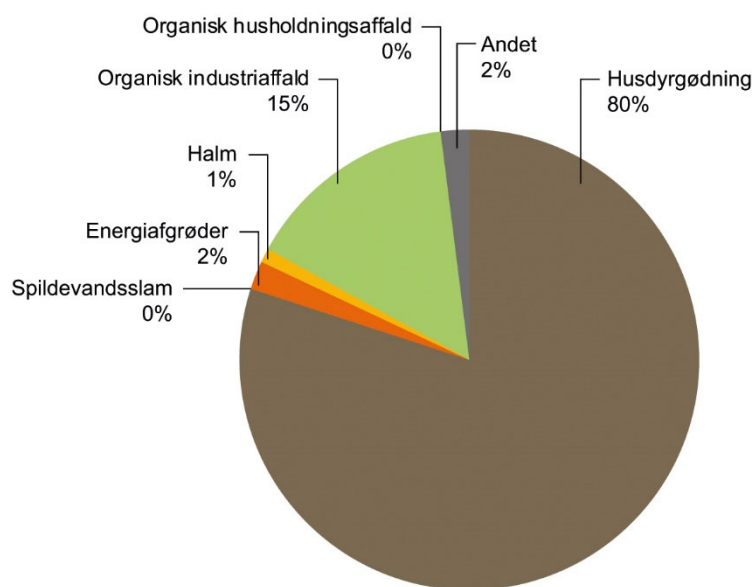
Samudrådning med organisk affald

Anlægskonceptet for fælles biogasanlæg er udviklet i Danmark siden 1987, og biomassen, der anvendes i disse anlæg og gårdbiogasanlæggenes, er vist i figur 2.8. Nogle få anlæg anvender spildevandsslam, men det forventes, at dette er under udfasning, eftersom det afgassede materiale ikke vil kunne anvendes

på gårde, der er underlagt Mejeriforeningens regler. Mængden af kildesorteret husholdningsaffald (KOD), der anvendes, er stigende efter, at Arlagården har åbnet op for, at dette kan anvendes på bedrifter, der leverer mælk til Arla. Tidligere har anvendelsen af KOD på biogasanlæg med malkekvægsbedrifter tilknyttet ikke være muligt, da anvendelsen ville betyde, at den afgassede gylle efterfølgende ikke ville kunne anvendes på disse bedrifter. I takt med at flere kommuner iværksætter kildesortering og separat indsamling af bioaffald, vil denne ressource nu kunne anvendes på alle husdyrgødningsbaserede biogasanlæg. Biogasanlæggene spiller en meget central rolle i forhold til at recirkulere næringsstoffer fra samfundet og fødevareindustrien. Biogasanlæggene har mulighed for at sikre en bedre omfordeling af næringsstofferne ved, at det afgassede materiale nemmere kan transporteres til aftagere uden for biogasleverandørkredsen og ved billigere faststofseparation som følge af stordriftsfordele. Separation er dog indtil videre kun praktiseret i begrænset omfang, og det eneste anlæg, der har gjort det over mange år, er Måbjerg Bio-Energi, hvor det – som nævnt – har været et krav i deres miljøgodkendelse.

Det faktum, at en stor andel af det fosfor, der findes i affaldsressourcer i Danmark, recirkuleres via biogasanlæggene fremfor at blive afbrændt (med risiko for at gå tabt for en jordbrugsmæssig anvendelse) kan udgøre en ressource-mæssig gevinst for samfundet, såfremt gødningsstofferne fortrænger anvendelse af handelsgødning og ikke medfører overskridelse af kvalitetskrav til gødningsproduktet. Dette kan imidlertid blive en udfordring, medmindre såvel affaldet som det afgassede produkt transporteres over store afstande, eftersom de fleste biogasanlæg ligger i husdyrintensive områder, hvor der i forvejen er tilstrækkelig fosfor, mens affaldsressourcen ofte kommer fra andre områder. I tillæg hertil er ekstraktion af fosfor fra forbrændingsaske en mulig alternativ recirkuleringsteknologi, som kan resultere i et mindre indhold af tungmetaller i gødningsproduktet.

Figur 2.8. Biomassesammensætning, eksklusiv KOD, i de husdyrgødningsbaserede biogasanlæg baseret på vådvægt (Mikkelsen et al., 2016)



Med de nye fosforlofter og lempelsen af harmonikravet til 170 kg N pr. ha vil den mængde afgasset gødning, der kan udbringes på harmoniarealet, ofte være begrænset af gødningens fosforindhold fremfor af kvælstofindholdet. Derfor vil det være en fordel, at N/P-forholdet er så højt som muligt, for at afgrøden kan få tilført det kvælstof, den har behov for inden for rammerne af fosforloftet,

så indkøb af handelsgødningsskvælstof kan undgås. I figur 2.9 er kvælstof, fosfor og N/P-forholdet angivet for 13 biogasanlæg og sammenlignet med normindholdet i kvæg- og svinegylle samt indholdet i den faste fraktion (se også afsnit 3, Optimering af fodringen af husdyr). Det gennemsnitlige N/P-forhold for de 13 anlæg er 7,1, hvilket er væsentligt højere end i svinegylle og på niveau med kvæggylle. Det betyder, at det generelt vil være en fordel for griseproducenter at være med i et biogasanlæg i forhold til den nye fosforlovgivning, mens det for kvægbrugerne i gennemsnit vil være uden betydning. Der er dog store forskelle mellem biogasanlæggenes N/P-forhold, og for en del anlæg vil det specielt for kvægbrug betyde, at de ved anvendelse af afgasset gødning vil udbringe relativt mindre kvælstof end ved anvendelse af rågylle.

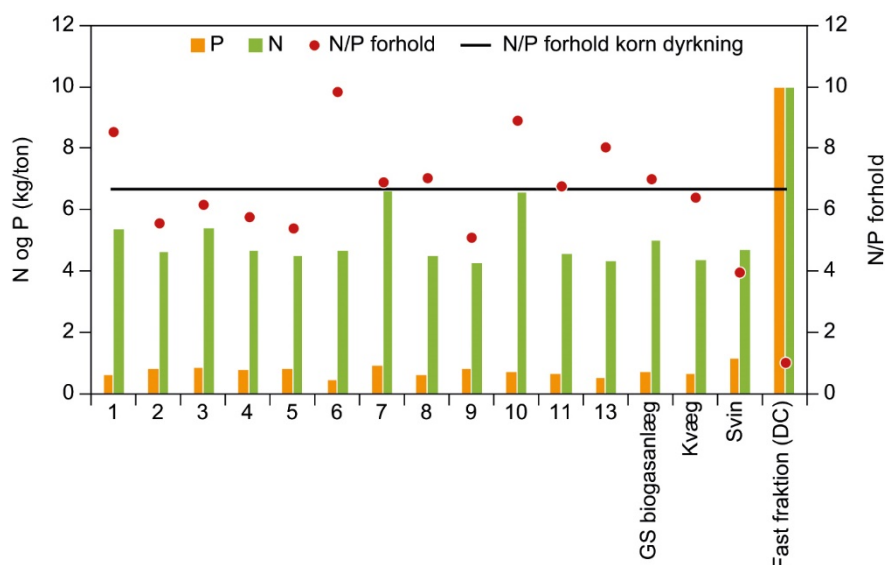
I fremtiden bør en del af de næringsstoffer, som er i overskud på husdyrbrug, afsættes til planteavlsbrug med et kornsædskifte. I den situation vil et N/P-forhold på minimum 6,5 være ønskeligt for at undgå, at mængden, der kan udbringes, begrænses af fosforindholdet. I gennemsnit opfylder de biogasanlæg, der deltog i undersøgelsen dette (Møller & Nielsen, 2016). Selvom N/P-indholdet i gennemsnit er tilfredsstillende, er der stadig en del biogasanlæg, der ikke opfylder dette kriterium. De forhold, der bestemmer N/P-forholdet, er fordelingen mellem kvæg- og svinegylle samt mængde og typer af affald, der bioforgasses. En stor andel kvæggylle vil trække N/P-forholdet i den rigtige retning, mens svinegylle trækker i den forkerte retning. Også fjerkræ og mink vil bidrage generelt til et mere u hensigtsmæssigt N/P-forhold, da gyllen herfra indeholder forholdsvis meget fosfor (se kapitel 3).

Affaldsressourcen bidrager generelt negativt i forhold til at ramme et optimalt N/P-forhold. Affaldstyper som slagteriaffald (mave/tarm), flotationsslam (slagteri) og valle (mejeri) har således N/P-forhold på omkring 3, 2 og 0,9.

Nogle anlæg anvender en vis mængde plantemateriale ved forgasningen, og her gælder det, at græs (N/P=7,8) og roer (N/P=8,8) bidrager til et mere hensigtsmæssigt N/P-forhold, mens majs (N/P=5,3) gør N/P-forholdet mindre hensigtsmæssigt, når det afgassede materiale skal anvendes som gødning.

Det er imidlertid i fremtiden ikke sikkert, at N/P-forholdet er så vigtigt, hvis gylleseparation vinder indpas, da N/P-forholdene i den flydende fraktion afviger meget fra 6,5. Endvidere vil der i vintersædsmarkerne ofte udbringes lidt rent kvælstof i marts, hvor marken ikke kan bære det tunge gylleudstyr. Dette ændrer behovet for N/P-forholdet ved den senere udbringning. Den eneste situation, hvor N/P ønskes på ca. 6,5, er således, når gødskningen sker ad én gang til eksempelvis vårafgrøder, hvor behovet for indkøb af handelsgødning ønskes reduceret mest muligt.

Figur 2.9. Indhold af kvælstof og fosfor samt N/P-forhold i en række biogasanlæg (Møller & Nielsen, 2016) (GS biogasanlæg angiver gennemsnit af de 13 anlæg). Desuden er vist normindholdet af N og P i kvæg- og svinegylle og i den faste fraktion. Ved beregning af N/P-forholdet til korndyrkning er der antaget at være 200 kg total-N/ha og 30 kg P/ha, hvor der forventes en N-udnyttelsesgrad på ca. 75 %. N- og fosforindhold i den faste fraktion er beregnet for en dekantercentrifuge (DC).



2.1.4 Transport og omfordeling af fosfor

Transportomkostninger ved traditionel håndtering (kort og lang afstand)

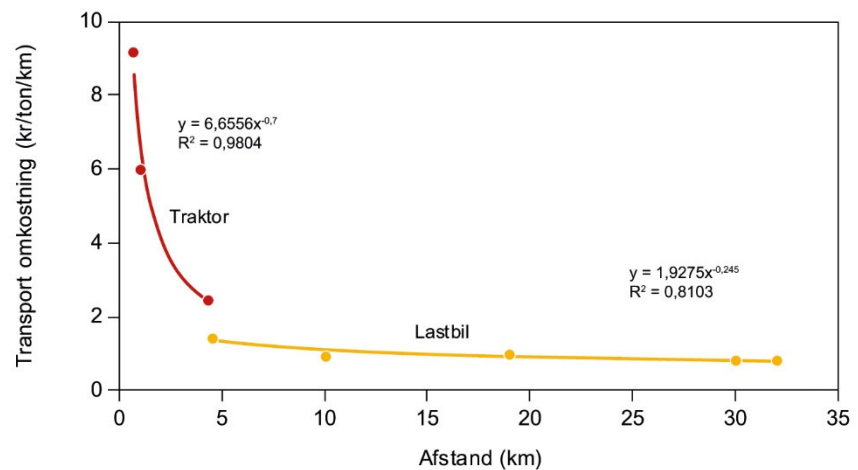
Der produceres hvert år omkring 30 mio. ton husdyrgødning (Poulsen, 2019), hvoraf en del transporteres forholdsvis langt på veje, inden den anvendes som gødning på markerne. Transporten sker enten med traktor og gyllevogn eller ved lastbiltransport evt. kombineret med buffertank ved marken. Lastbiltransport sker hyppigst, når der skal flyttes store gyllemængder over lang afstand og i forbindelse med transport af gylle til og fra biogasanlæg. Pumpning af gylle ved hjælp af rørlagte ledninger er endnu ikke udbredt og sker kun i meget begrænset omfang.

Udbringningen i marken sker enten med slæbeslanger eller ved nedfældning. Nedfældningen har den højeste omkostning, men da selve udbringningen på marken ikke påvirker prisen for at flytte fosforet på vejene, er denne del udeladt i nærværende rapport.

Pedersen (2007) har udført et casestudie til beregning af udgiften til transport af gylle. Udgiften til transport med lastbil og traktor er vist i figur 2.10. Prisen ved lastbiltransport er altid lavere, med mindre afstanden er meget kort. Ved afstande på over 10 km er omkostningen under 1 kr./ton/km, mens prisen ved korte afstande er langt højere, da der er en del faste udgifter forbundet med tømning og fyldning af bil.

I fjerkræproduktionen er næsten al gødning på fast form og med et højt indhold af tørstof og fosfor. Der produceres årligt omkring 300.000 ton fjerkrægødning (SEGES). Fosforkoncentrationen i fjerkrægødning er omtrent 10 gange højere end i gylle (kg P/tons) og på niveau med indholdet i den faste fraktion fra centrifugeret gylle. Dermed udgør fosfor i fjerkrægødning ca. 6 % af mængden af den totale mængde fosfor, der findes i gylle, og udgifterne til transport af fosfor i fjerkrægødning er betydeligt lavere pr. kg fosfor end for de øvrige gødningstyper, uden at der kræves behandling af gødningen.

Figur 2.10. Omkostninger ved lastbiltransport af gylle med traktor/vogn og lastbil (baseret på tal fra Pedersen (2007) og Jacobsen (2017).)



Transportomkostninger ved separering

I forhold til at optimere udnyttelsen af fosforressourcen i Danmark, kan fraktionering af husdyrgødning være fordelagtig, idet der kan produceres en fosforrig fraktion, og dermed væsentligt mindre mængder materiale, der skal transporteres. Til gengæld er der omkostninger forbundet med produktionen af den fosforrige fraktion. Omkostningen til produktion af den fosforrige fraktion er, som nævnt, meget afhængig af mængden af gylle / afgasset gylle, der separeres. Det vurderes, at den lavest mulige pris er i størrelsesordenen 6 kr. / ton gylle ved anvendelse af dekantercentrifuge (tabel 2.3), og at det kræver at der separeres mere end 200.000 ton gylle om året. Så store mængder findes, som nævnt, kun på fælles biogasanlæg, hvor Måbjerg er det eneste anlæg, der i en længere årrække konsekvent har anvendt separation på mere end 300.000 ton om året. Prisen ved anvendelse af skruepresse er lavere, men her er potentialet for separation af fosfor oftest for lavt til at opfylde behovet.

Udgiften ved fraktionering kontra transport af afgasset gødning uden efterbehandling skal holdes op mod værdien som gødning i marken. Gødningsværdien i marken afhænger af den udnyttelsesgrad, der kan opnås af de enkelte næringsstoffer, og den pris, som de tilsvarende næringsstoffer koster i handelsgødning. Det er vanskeligt at værdisætte alle næringsstoffer, og i nærværende studie er der kun set på kvælstof, fosfor og kalium. De anvendte priser og forventede udnyttelsesprocenter er angivet i tabel 2.5.

Koncentrationen af næringsstoffer i fraktionerne varierer i forhold til den anvendte teknologi. I tabel 2.6 er værdien af fiberrige fraktioner sammenlignet med afgasset gylle som reference. Det fremgår, at værdien af fraktionerne ved anvendelse af dekantercentrifuge er langt højere end for skruepresse.

Ud over den traditionelle beregning af næringsstofværdien er der en værdi ved tilførsel af organisk materiale i forhold til jordstruktur og jordfrugtbarhed, som det imidlertid er vanskeligt at værdisætte. Omvendt kan der være køreskader i afgrøden og strukturskader i jorden ved kørsel med gyllevogne i perioder, hvor markerne ikke er tørre.

Tabel 2.5. Anvendte næringsstofværdier og anslåede udnyttelsesprocenter for fast og flydende fraktion efter separering. ¹Korndatabasen d. 14. august 2018. ²Petersen & Sørensen (2008).

Næringsstof	Værdi af næringsstoffer (kr./kg)	Udnyttelse ved fast fraktion (%)	Udnyttelse ved fast fraktion (%)	Udnyttelse ved flydende fraktion (%)
N ¹	6,5	25	45	85 ²
P ¹	12	100	100	100
K ¹	6	100	100	100

Tabel 2.6. Næringsstofindhold og beregnet værdi for fraktionerne ved anvendelse af forskellige teknologier på forskellige gødningsfraktioner og næringsstoffernes værdi (tabel 2.5).

Type	TS %	TN kg/ton	P kg/ton	K kg/ton	Værdi kr./ton	Reference
Dekanter	32,7	11	10,5	3	161,9	Sørensen & Møller, 2006
(fiber fraktion)	21,1	2	4	3,5	72,3	Sørensen & Møller, 2006
	32,6	15	12	2,5	183,4	Sørensen & Møller, 2006
	29,1	10	10	2,8	153,1	Lunde, 2018
Skruepresse	36,3	6,9	2,13	2,5	51,8	Møller et al., 2007a&b
(fiber fraktion)	37,3	5,8	2,04	3	51,9	Møller et al., 2007a&b
	30,2	6,5	2,3	3	56,2	Møller et al., 2007a&b
Fjerkrægødning	48					Normtal 2017, (Poulsen 2004-2017)
		25,1	7,5	17,9	270	
Gylle	22,2	5	1,2	3	56,8	Møller et al., 2016

Ud over den traditionelle beregning af næringsstofværdien er der en værdi ved tilførsel af organisk materiale i forhold til jordstruktur og jordfrugtbarhed, som det imidlertid er vanskeligt at værdisætte. Omvendt kan der være køreskader i afgrøden og strukturskader i jorden ved kørsel med gyllevogne i perioder, hvor markerne ikke er tørre.

Beregningerne af transportudgifter er baseret på en række nøgletal og antagelser, der er angivet i tabel 2.7.

Tabel 2.7. Eksempel på nøgletal for beregning af udgifter til transport af ikke separeret gylle og af fast fraktion ved anvendelse af dekantercentrifuge (Lunde, 2018).

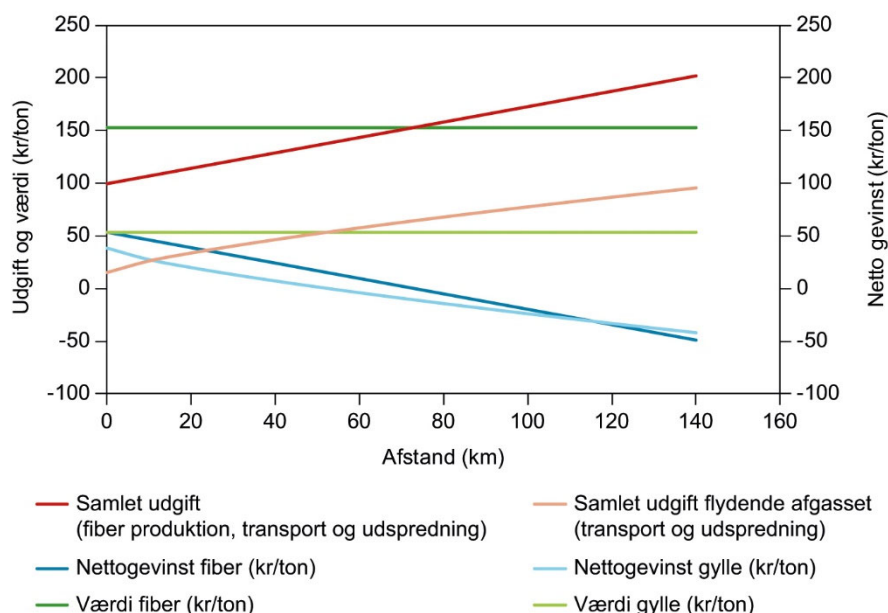
Parameter	Pris Enhed	Reference
Transport af fast fraktion	600 kr./time	Lunde, 2018
Gennemsnitshastighed	50 km/time	Lunde, 2018
Lastmængde	22 ton/læs	Lunde, 2018
Transportpris (fiber/fjerkrægødning)	0,545 kr./km/ton	Beregnet
Transportpris (fiber/fjerkrægødning)	12 kr./km	Beregnet
Andel af fast fraktion/fjerkrægødning)	10 % af gyllemængden	Lunde, 2018
Separationsomkostning	60 kr./ton fiber	Beregnet
Separationsomkostning	6 kr./ton afgasset gylle	Beregnet
Udspretningsomkostning	30 kr./ton fiber	Lunde, 2018
Værdi fast fraktion	153 kr./ton fiber	Beregnet
Administration	20 kr./ton	Lunde, 2018

Med de givne forudsætninger er det muligt at beregne transportudgiften ved fraktionering og sammenligne det med transport af flydende afgasset materiale. Figur 2.11 viser den samlede beregnede udgift ved at producere, håndtere, transportere og udbringe en fast fraktion med en dekantercentrifuge som funktion af afstand. Når den samlede udgift sammenholdes med værdien af den faste fraktion, kan det beregnes, hvor langt den faste fraktion kan transporteres, inden der bliver en nettoudgift. Det fremgår, at der indtil en afstand på 78 km er en samlet positiv økonomi ved at transportere og anvende fast fraktion. Dette forudsætter imidlertid, at der er en aftager, der vil betale den teoretiske plantedyrkningsmæssige værdi af næringsstofferne (tabel 2.6). Erfaringen fra bl.a. Måbjerg viser dog, at markedet ikke er villig til at betale dette, og i stedet for den beregnede værdi på 153 kr./ton leveres og udbringes fiberen i marken oftest uden beregning.

Eftersom der er en meget stor udgift forbundet med at producere fiberen, er der regnet på et simpelt referencescenario, hvor det flydende afgassede materiale afsættes direkte. Herved spares udgiften til separationen, ligesom transport af flydende materiale er billigere pr. ton, da der kan transporteres større mængder i lastbilerne. Ved transport af flydende afgasset materiale er afstanden ca. 50 km, før udgifter og værdi når nulpunktet. Ligesom for fiberfraktionen er der i dag ikke betalingsvillighed i landbruget til at betale den fulde værdi. Erfaringen er således, at der oftest ikke betales for den flydende afgassede gødning, og hvis biogasanlægget skal transportere flydende gødning over større afstande, end man hidtidig har gjort pga. skærpede fosforudbringningskrav, vil det betyde ekstra omkostninger for biogasanlæggene fremover.

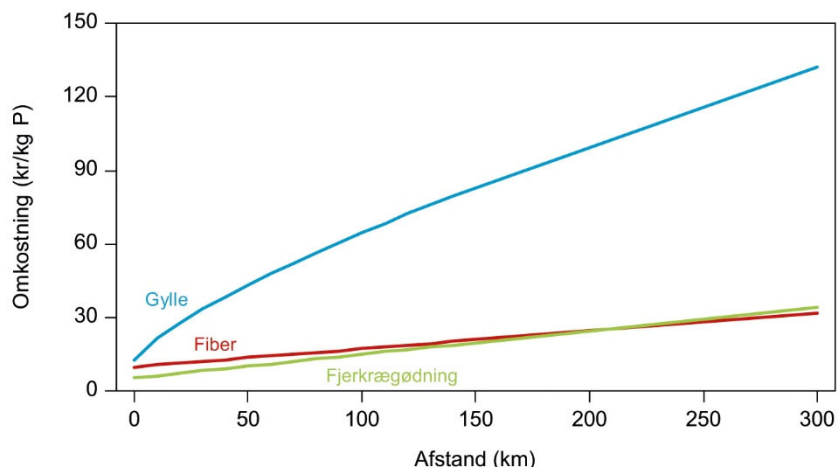
Beregningerne viser, at der ikke er den store forskel mellem at transportere flydende afgasset materiale i forhold til at transportere fiberfraktionen. Dog vil der miljømæssigt i forhold til CO₂-udledningen være en stor belastning forbundet med at transportere flydende husdyrgødning over større afstande udelukkende af hensyn til fosfor.

Figur 2.11. Udgifter forbundet med produktion, håndtering, transport og udbringning af fiberig fraktion og flydende afgasset gødning uden separering. Forudsætninger for beregninger er angivet i tabel 2.6 og 2.7.



Da fraktionering af flydende gødning oftest udføres for at eksportere fosfor ud af et område, er det relevant at regne på omkostningen for transport og udbringning pr. kg fosfor. I figur 2.12 er den samlede udgift til produktion, transport og udspredning beregnet, under forudsætning af at landmanden, der modtager gødningen, ikke betaler noget. Dette svarer til et worst case-scenario, hvor målet er at flytte fosfor fra et område med overskud til et område, hvor der er et behov. Dette er situationen på Måbjerg Bioenergi i dag, hvor det – som nævnt - ikke er muligt at opnå en pris for næringsstofferne. Som reference er der sammenlignet med udgiften for flydende afgasset gylle.

Figur 2.12. Omkostning til produktion, transport og udbringning pr. kg fosfor i forhold til transportafstand. Omkostningen er ikke fratrullet værdi af næringsstoffer.



Det fremgår, at udgiften pr. kg fosfor er langt lavere ved fraktionering i forhold til transport af den afgassede flydende gødning uden separering. Den samlede pris pr. kg fosfor efter fraktionering og transport af den faste fraktion varierer fra 10 til 31 kr./kg P ved en afstand fra 0-300 km og er i alle tilfælde på niveau med eller over markedsprisen for mineralsk fosfor. Der kan imidlertid opnås positive sideeffekter i form af bedre udnyttelse af den flydende fraktion, da ammoniakfordampning mindskes ved separation. Den positive gevinst i form af mindsket ammoniak forudsætter, at den faste fraktion håndteres på en måde, så tab fra denne fraktion minimeres, da den positive gevinst i den flydende fraktion kan opvejes af tab fra den faste fraktion.

Hvis der antages 20 % ammoniaktab ved gylleudbringning af afgasset gylle (udbringning på jordoverfladen i etableret afgrøde i april måned varierer mellem 10 og 20 % afhængig af gylletypen – lavest for svin, dernæst kvæg og højest for afgasset gylle), betyder det, at i afgasset gylle med 3 kg TAN (Total ammonium N)/ton vil tabet være 0,6 kg TAN/ton i en normal situation (Nyord, 2018). Ved separering, hvor vi får 90 % af ammoniak over i væskefraktionen, vil tabet være $0,9 \times 3 \times 0,1 \times 0,5 = 0,135$ kg TAN/ton oprindelig gylle, under forudsætning af at tabet fra væskefraktionen er 10 % som følge af hurtigere infiltration (Nyord, 2018). Hvis det antages, at der er 30 % tab i den faste del, giver dette $0,1 \times 3 \times 0,3 = 0,09$ kg TAN/ton oprindelig gylle. Samlet giver dette følgende:

Afgasset	0,6 kg TAN/ton oprindelig gylle
Flydende	0,135 kg TAN/ton oprindelig gylle
Fast	0,09 kg TAN/ton oprindelig gylle.

Den samlede gevinst ved separering bliver hermed $0,6 - 0,135 - 0,09 = 0,375$ kg / ton afgasset gylle eller 6,5 kr. / kg N * 0,375 = 2,44 kr. / ton gylle. Hvis der kan undgås tab i den faste fraktion, bliver gevinsten $6,5 \text{ kr. / kg N} * 0,375 + 0,09 = 3,02$ kr. / ton gylle. Hvis den potentielle gevinst i form af mindsket ammoniakfordampning indregnes, vil dette betyde en betydelig mindre udgift til separation, og i bedste tilfælde vil dette kunne betale ca. halvdelen af separationsomkostningen.

Erfaringer fra Nederlandene

Husdyrproduktion i Nederlandene omfatter cirka 1,6 mio. malkekøer, 12 mio. grise og 100 mio. fjerkræ (Jacobsen, 2017). De producerer omkring 70 mio. ton gødning eller mere end dobbelt så meget som i Danmark. Landbrugsarealet udgør cirka 1,8 mio. ha, hvilket er lidt mindre end det danske på cirka 2,6 mio. ha. Samlet set er husdyrintensiteten i Nederlandene således højere end i Danmark. Nederlandene har som følge af den høje husdyrproduktion i mange år fokuseret på at reducere fosforanvendelsen og fosfortabet fra landbrugsarealerne. Eftersom der ofte er stor afstand mellem planteavlere og husdyrproducenter, har dette resulteret i høje omkostninger til transport af husdyrgødning. Ifølge Jacobsen (2017) er der en del uforarbejdet gylle, der transporteres 50-150 km. De gennemsnitlige omkostninger for gødning, der transporteres, er opgjort til 75 kr. pr. ton for kvæg- og fjerkræbedrifter, mens det er cirka 126 kr. pr. ton for grisebedrifter (Jacobsen, 2017). De høje omkostninger til transport har gjort det rentabelt at anvende separationsteknologi, og da behandlingen ofte sker lokalt på gårdene, er der opbygget en industri, der tilbyder landmændene separation med en mobil dekantercentrifuge, hvor prisen er langt højere end stationære anlæg (Sørensen & Møller, 2006) med en høj kapacitet. Ifølge Jacobsen (2017) er prisen således ca. 26 kr. / ton, som skal holdes op mod ca. 6-9 kr. / ton på danske biogasanlæg (tabel 2.3). Ud over separation af gylle er der flere anlæg, der udfører en videre forarbejdning af den flydende fraktion, hvor der sker nitrifikation / denitrifikation og dermed omdannelse af det meste kvælstof til N_2 .

Endeligt afbrændes en stor del af fjerkrægødningen på et stort centralt anlæg (430.000 ton pr. år). Anlægget BMC Moerdijk behandler således en tredjedel af den samlede produktion af fjerkrægødning hvert år (Graaff et al., 2017) og genererer 285.000 MWh elektricitet gennem forbrænding af gødningen. Afbrændingen resulterer i ca. 60.000 ton aske, hvoraf en del eksporteres ud af landet.

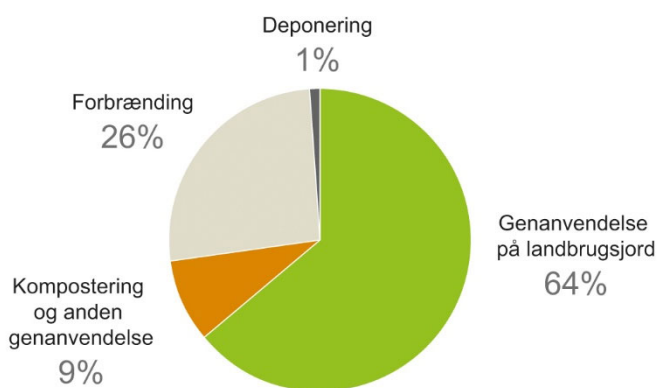
Overordnet kan det konkluderes, at der er en meget høj omkostning til at behandle og transportere husdyrgødning i Nederlandene, og at denne omkostning afholdes af landmændene. For fjerkrægødning har de høje omkostninger betydet, at der er valgt at afbrænde en betydelig andel heraf.

2.2 Spildevand

Fosforgenvinding fra spildevand kan ske fra vandfasen, ved berigelse i slamfasen, ved anvendelse af sludslam på landbrugsjord og ved ekstraktion af fosfor fra slamaske (Jensen et al., 2015). Fosforberiget slam kan opnås ved hhv. kemisk og biologisk fosforbinding. Detaljer omkring design af renseanlæg og om, hvorvidt der er tale om anaerob slambehandling med biogasproduktion, behandles ikke videre i nærværende rapport, da det ikke har den store indflydelse på recirkuleringen af fosfor. For detaljer omkring genvinding af fosfor fra spildevand henvises til Jensen et al. (2015).

Den mest almindelige teknologi til genvinding af fosfor fra spildevand er kemisk fosforfældning i slamfasen. Før slammet kan nyttiggøres eller bortskaffes, skal det normalt forbehandles, hvilket sker ved bioforgasning, kompostering eller slammineralisering (omsætning af slammets organiske materialeindhold i tilplantede bassiner). For slam, der ikke lever op til affald-til-jord-bekendtgørelsens kvalitetskrav (tabel 2.8), sker slutdisponering til forbrænding med energiudnyttelse, eller slammet bliver, mere sjældent, kørt til et deponeringsanlæg (Miljøstyrelsen, 2017).

Figur 2.13. Behandling af slam fra rensningsanlæg i 2016 angivet i ton tørstof (Miljøstyrelsen, 2018b).



Fosforindholdet i slam ligger på omkring 31-37 kg P / ton tørstof (Jensen et al., 2015; NaturErhvervstyrelsen, 2016). Ud over fosfor i husdyrgødning udgør fosfor fra spildevand den største fosforkilde inden for landets grænser, svarende til 25-33 % af mængden af importeret handelsgødning (Jensen et al., 2015).

Tabel 2.8. Grænseværdier for cadmium (Cd), kviksølv (Hg), bly (Pb), nikkel (Ni), krom (Cr), zink (Zn) og kobber (Cu) i affald (slam) til jordbrugsformål.

	Cd	Hg	Pb	Ni	Cr	Zn	Cu
Affald-til-jord-bekendtgørelsen, [mg/kg TS] ¹	0,8	0,8	120	30	100	4.000	1.000
Affald-til-jord-bekendtgørelsen, [mg/kg P] ¹	100	200	10.000	2.500	-	-	-
Økologiforordningen, [mg/kg TS] ²	0,7	0,4	45	25	70	200	70
Bioaskebekendtgørelsen, [mg/kg TS] ³	5 ⁴ ;20 ⁵	0,8	120;250 ⁶	60	100	-	-

¹Grænseværdier for slam til konventionelt landbrug, bekendtgørelse nr. 1001 af 27/06/2018 (bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål).

²Grænseværdier for komposteret eller forgæret husholdningsaffald til økologisk jordbrug. Miljø- og Fødevareministeriet 2018 (vejledning om økologisk jordbrugsproduktion).

³ Grænseværdier for bioaske generelt og specifikt for ⁴halmaske og blandet halm- og træaske, ⁵træaske og ⁶træaske anvendt i skovbrug-træaske, bekendtgørelse nr. 818 af 21/07/2008 (bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål – bioaskebekendtgørelsen).

Affald-til-jordbekendtgørelsen omfatter, ud over krav til slam udbragt til jordbrugsformål, også kvalitetskrav til gødning produceret fra anden forbeholdt biomasseaffald. For KOD, forbeholdt til biopulp, gælder kravene til biopulpen, før den tilføres biogasanlægget (NaturErhvervstyrelsen, 2016). Herudover er KOD samudrånnet på husdyrgødningsbaserede biogasanlæg underlagt økologiforordningens kvalitetskrav, og fosforgødning udvundet fra halm og træaske er underlagt krav iht. bioaskebekendtgørelsen (tabel 2.8).

I dag udbringes 64% af den totale mængde spildevandsslam, som lever op til kvalitetskravene i affald-til-jord-bekendtgørelsen på landbrugsjord. De 26%

af slammet, som ikke lever op til kvalitetskravene i affald-til-jord bekendtgørelsen, forbrændes og lagres i såkaldte fosforbanker iht. Danmarks Strategi for anvendelse af ressource i affald (Miljøstyrelsen, 2014) mhp. senere genvinding af fosforindholdet i forbrændingsasken.

Anvendelse af bioaske fra forgasning og forbrænding af biomasse og biomas-seaffald til jordbrugsformål er omfattet af reglerne og grænseværdierne i bioaskebekendtgørelsen (Bekendtgørelse nr. 818 af 21/07/2008 om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål).

2.2.1 Direkte udbringning af stabiliseret slam på landbrugsjord

For at spildevandsslam kan udbringes direkte til marken, skal slammet først stabiliseres på rensningsanlægget.

Substitutionspotentiallet (gødningsværdien af det fosfor, slammet indeholder) ved direkte udbringning af slam (dvs. i hvilket omfang det fosfor, der er i slammet, kan erstatte en tilsvarende mængde fosfor givet som handelsgødning til den afgrøde, slammet udbringes til) varierer og påvirkes af de teknologier og fædningskemikalier, der anvendes i renseanlæggene. Gødningsværdien kan variere meget mellem 30 % (eller endnu lavere), hvor der er anvendt kemisk fældning, til 100 %, hvor der er anvendt biologisk fosforfjernelse (Jensen et al., 2015, Delin, 2015). Selv om kun en mindre del af fosforindholdet udnyttes lige så effektivt som handelsgødningsfosfor af den første afgrøde, må det forventes, at en stor del af fosforet bliver tilgængeligt på længere sigt (Jensen et al., 2015). Den langsigtede effekt af fosfor tilført i produkter som spildevandsslam er vanskelig at måle og derfor dårligt dokumenteret (Rubæk et al., 2018).

Ud over grænseværdierne for tungmetaller i affald-til-jord-bekendtgørelsen og krav om slamstabilisering er tidsrummet for udbringning af slam begrænset, da slammet kun må udbringes i visse måneder. I de måneder, hvor slammet ikke kan udbringes direkte efter behandlingen på renseanlægget, bliver det mellemlagret i miljøgodkendte beholdere.

2.2.2 Udrådning

Udrådning er en proces, som nedbryder slammet under iltfrie forhold i en rådn-tank (biogasreaktor). Slammet pumpes ind i rådn-tanken med et tørstofindhold på omkring 30 % (Thomsen et al., 2015). Slammet varmes op (ved udnyttelse af en del af den producerede biogas) til 35-37 grader (mesofil proces) eller 52-54 grader (termofil proces) og pumpes ind i den egentlige reaktortank, hvor det nedbrydes biologisk i ca. 2-4 uger og afvandes herefter. Ca. 20-50 % af det organiske materiale i slammet omsættes under udrådningen, hvorved blandt andet fosfor frigives. En del af det frigivne fosfor føres tilbage til renseanlægget med rejektvandet fra slamafvandingsprocessen (Jensen et al., 2015).

Den afgassede, afvandede biomasse indeholder ifølge Oberender et al. (2013) typisk 20-30 % tørstof, 5 % N, 2,5 % P og 1 % K i forhold til tørstof. På danske renseanlæg er der dog stort fokus på genvinding af ressourcerne i spildevandet, og afhængig af teknologidesignet kan indholdet af næringsstoffer i slutslammet ligge noget højere (Thomsen et al., 2015; van der Hoek et al., 2018). Hvis udrådnat slam overholder grænseværdierne for miljøfremmede stoffer og tungmetaller, kan den udbringes som gødning på landbrugsjord.

2.2.3 Tørring og forbrænding

Tørret slam kan forbrændes i et slamforbrændingsanlæg (hvilket giver mulighed for at genvinde fosfor fra slamasken, se afsnit 2.2.6). Slammet kan samforbrændes i kraftvarmeverker eller bruges som brændsel i andre industrielle processer som fx cementproduktion.

Udrådnet slam afvandes først gennem brug af sibåndpresser, centrifuger etc., hvorefter der typisk cirkuleres varm luft gennem slammet, som på denne måde samtidig hygiejniseres. Brændværdien på tørret slam med 90 % tørstof er på ca. 12 MJ/kg, svarende til brændværdien af træflis (Oberender et al., 2013).

2.2.4 Kompostering

Kompostering er den biologiske nedbrydning af organisk materiale og omdannelse til kompost under tilstedeværelse af ilt. Komposten udbringes efterfølgende, fx som organisk gødning og jordforbedringsmiddel på landbrugsjord.

Ifølge Oberender et al. (2013) er milekompostering den mest anvendte komposteringsproces i Danmark. Komposteringen foregår herved i lange, trapezformede bunker, hvor det organiske materiale (fx slam) ligger blandet med have- og parkaffald, som forbedrer strukturen, og andre fraktioner, som justerer forholdet mellem kulstof og kvælstof (C / N-forholdet) i blandingen. Milerne vendes regelmæssigt for at sikre materialets forsyning med ilt; samtidig tabes der ammoniak afhængig af C / N-forholdet. Komposteringsprocessen tager ca. 4-12 uger, hvorefter komposten eftermodnes i 2-4 måneder.

I modsætning til milekompostering (Oberender et al., 2013) foregår containerkompostering i lukkede containere, dog som aerob proces med luftkontakt, hvor materialet ligger på en dobbelt hulpladebund. Formålet med containerkompostering er bl.a. at undgå lugtgener eller vandtilførsel fra nedbør. Efter 10-15 dage hygiejniseres materialet med varm luft, som opvarmer kompostblandingen til 70 grader. Efter ca. én måned bliver materialet lagt ud i miler, hvor det eftermodnes.

Som for andre behandlingsteknologier af bioaffald, kan der ved kompostering være et tab af lattergas (N_2O) og ammoniak (NH_3). Dokumentation af emissioner ved kompostering af slam og KOD er yderst begrænset, til gengæld findes der målinger for fast husdyrgødning inklusive biogasrester. Her er der målt betydelige tab af NH_3 ved kompostering og også mindre tab af N_2O som er afhængig af bl.a. beluftning og temperatur (fx Hansen et al., 2008; Thomsen, 2016; Nielsen et al., 2019a, b). Afhængig af materialets sammensætning tabes typisk knap halvdelen af kvælstoffet ved kompostering (Hansen et al. 2008).

2.2.5 Mineralisering af slam

Slammineralisering er en biologisk proces, hvor slammet mineraliseres af mikroorganismer i et jordbassin tilplantet med fx tagrør. Den biologiske omsætning medfører, at miljøfremmede organiske stoffer i slammet nedbrydes, således at det endelige produkt opnår kvaliteten og konsistensen af tørvejord, når bassinerne tømmes ca. hver 10. år (Oberender et al., 2013) – med et højere tungmetalindhold, som svarer til slammets sammensætning.

Slammet drænes derudover gennem bassinets bund, mens tørstofindholdet bliver tilbage i bassinet. Sammen med fordampning fra bassinets overflade og

planternes evapotranspiration bevirker dette, at slammets volumen yderligere reduceres.

2.2.6 Nyere teknologier til slambehandling med udviklings- og anvendelsespotentialer

Fosforekstraktion fra slammaske

Der deponeres p.t. ca. 3 % af slamasken med et fosforindhold på ca. 5-10 % uden mulighed for videre oparbejdning i Danmark (Egle et al., 2014). Hvis askens fosforindhold ikke skal gå tabt, er det nødvendigt, at det deponeres separat fra andre forbrændingsasker (fx dagrenovation), da en sammenblanding af slamtyper gør genvindingsprocessen mere vanskelig (Oberender et al., 2013). Ved lagring af slammaske på særlige fosfordepoter bevares muligheden for en evt. genvinding af fosfor fra asken på et senere tidspunkt. 97-99,9 % af fosfor fra spildevandsslam sendt til forbrænding akkumuleres i asken. Fosforindholdet i asken er bundet i forskellige mineralske stoffer, ligesom det er tilfældet med råfosfat.

Teknologierne til fosforgenvinding fra slammaske kan kategoriseres i (våd-) kemiske og termiske processer (se fx Egle et al., 2015). Formålet med teknologierne er fjernelsen af forureninger (især tungmetaller) og en øget opløselighed af fosfor i slutproduktet (Miljøstyrelsen, 2015, 2018b; <http://www.aquagreen.dk/>).

I et stort EU-projekt (P-REX) undersøges i øjeblikket to termiske (ASH DEC og Mephrec) og to vådkemiske teknologier (Ecophos og Leachphos) til indvinding af fosfor i aske. Fælles for processerne til genanvendelse af fosfor fra slammaske er, at det med de aktuelle lave fosforpriser er en stor udfordring at udvikle en proces, som både er rentabelt og fremstiller et eftertragtet produkt med en høj kvalitet af fosfor og et lavt indhold af urenheder (tungmetaller og metaller).

Ved kemisk genvinding af fosfor fra asken opløses asken typisk i en syre eller base, hvorefter fosfor og tungmetaller findes i opløst form i væsken (Miljøstyrelsen, 2018b). Dette medfører, at tungmetallerne må fjernes, inden fosfor kan bruges til gødning. Separering af fosfor og tungmetaller sker typisk via pH-fældning, hvor udfældningen af specifikke metaller og salte styres gennem pH-justering, hvilket giver mulighed for en separering af fosfor og fjernelse af forureninger. I nogle tilfælde er det dog nødvendigt at tilsætte fældningskemikalier for at få fjernet tungmetallerne. Oberender et al. (2013) oplyser, at 5-40 % af askens fosforindhold går tabt afhængig af den specifikt valgte proces, mens andelen af vandopløseligt fosfor er på op til 95 %. Tungmetaller kan i praksis fjernes fuldstændigt.

Som termiske processer findes der pyrolyse af slam med forgasning og termisk-kemisk behandling af aske. Pyrolyse foregår under iltfrie forhold, hvorved forgasningsgas kan udnyttes til energiproduktion, og det faste reststof kan forarbejdes videre til brug på landbrugsjord. I termisk-kemisk behandling af slammaske tilsættes der kemikalier, som ved høj temperatur reagerer med tungmetallerne (CaCl_2 eller MgCl_2 ; Oberender et al., 2013), således at tungmetalklorider forflygtiges, samtidig med at fosfor indgår forbindelser med fx calcium, som øger plantetilgængeligheden. Teknologien er eksemplificeret af AshDec-processen (se Egle et al., 2015), hvorved 98 % af askens fosforindhold bevares i gødningsproduktet (med 70 % citratopløselig fosfor og 25 % vandopløselig fosfor) og fordampning af 99 % af tungmetallerne fra asken.

En af de processer, som er under udvikling, er Crystal-P processen, som er en vådkemisk proces, hvor slammaske (jernfældet) opløses i saltsyre og vand. Efter passende reaktionstid frafiltrereres den syreuopløselige rest, også kaldet "aske-rest". Ekstraktionsvæsken, som indeholder opløst fosfor i form af fosforsyre og andre urenheder fra slammasken, blandes med en calciumkloridopløsning inden reaktiv krystallisation. Under den reaktive krystallisation ønskes udfældet $\text{CaClH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -krystaller, som efter varmebehandling ved 150-350°C omdannes til calciumfosfat, som kan sælges til fosforindustrien og substituere brugen af råfosfat. Teknologien har tidligere været afprøvet af Ekokem (Miljøstyrelsen, 2018b).

Fosforgenvinding fra rejektvand: biologisk fosforfjernelse (Bio-P) og struvitudfældning

Når udrådnet spildevandsslam afvandes, kan der genvindes fosfor fra det producerede rejektvand, som typisk indeholder ca. 50-400 mg P/L (Oberender et al., 2013). Mens tungemetalindholdet generelt er lavt og overholder kravene i affald i henhold til jordbekendtgørelsen i denne henseende (se afsnit 2.2.2 og tabel 2.8.), er der stor forskel på indholdet af organisk stof i rejektvandet. Dette er afhængig af de foregående procestrin.

En række teknologier eksisterer og markedsføres (se Oberender et al., 2013; Egle et al., 2015; Jensen et al., 2015) til udfældning af magnesiumammoniumfosfat ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), som er mest kendt under navnet struvit eller MAP (hvilket ikke må forveksles med en anden MAP, monoammoniumfosfat, et gødningsprodukt med andre egenskaber end struvit). Struvit kan også udfældes ukontrolleret i et renseanlæg og give aflejringer i rørledninger og varmevekslere og øgede driftsomkostninger.

Til en kontrolleret udfældning af struvit er det nødvendigt, at der findes en tilstrækkelig mængde magnesium i det udrådnede slam. En direkte udledning af alt magnesium i renseanlæggets udløb forhindres ved brugen af bakterier til biologisk fosforfjernelse (se fx Oberender et al., 2013). I denne såkaldte Bio-P proces bruger bakterierne en del af spildevandets magnesiumindhold til at binde fosfor i cellen, således at en større andel af magnesiumet forbliver i slammet (og hermed rejektvandet). Hvis mængden af magnesium, ammonium og fosfat er tilstrækkelig, udfældes der ved et bestemt pH-interval struvit (basisk pH). Struvitudfældning behøver i dag ikke at være et problem, men er derimod en løsning i forhold til ekstraktion af ressourcer i spildevand. Struvit indeholder 5,5 % ammonium-N og 12,5 % fosfor og er et velegnet gødningsprodukt.

2.2.7 Muligheder og barrierer

Kvalitet

Spildevandsslam er over de seneste årtier blevet renere og renere og udgør i Danmark den største kilde til genvinding og tilbageførsel af fosfor til landbruget.

BioP-teknologien er favorabel for anlæg, hvor slamkvaliteten lever op til slamdirektivets kvalitetskrav (tabel 2.8).

Det er i dag ikke tilladt at anvende spildevandsslam eller produkter derfra på økologiske landbrug, bl.a. på grund af danske regler og EU-regler for økologisk jordbrug. Der produceres allerede struvit på fire renseanlæg i Danmark (NaturErhvervstyrelsen, 2016), og struvit er godkendt som gødningsprodukt på lige fod med handelsgødning, og nyere teknologiudvikling viser potentielle for konkurrencedygtige priser (Miljøstyrelsen, 2018b).

Økonomi

Jensen et al. (2015) angiver en pris på ca. 12 kr./kg fosfor i handelsgødning (og 5-7 kr./kg P i råfosfat importeret fra Marokko) og en stigende tendens i prisudviklingen, mens Egle et al. (2014) angiver priser på 15-18 kr./kg P (2-2,5 €/kg P). Ved en pris på 850 kr. pr. ton råfosfat med et fosforindhold på 13 % vil fosforprisen komme helt ned på 6,5 kr. pr. kg (Miljøstyrelsen, 2018b).

Omkostningerne til fosforgenvinding fra spildevand såvel som slamforbrændingsaske skal i de fleste tilfælde længere ned for at kunne konkurrere med markedsprisen på handelsgødning (NaturErhvervstyrelsen, 2016; Miljøstyrelsen, 2018b; Thomsen et al., 2015). Overbliksmæssigt ligger omkostningerne til fosforgenvinding fra spildevand ifølge Jensen et al. (2015) på 45 kr./kg P ved direkte udspredning på landbrugsjord, på 74 kr./kg P ved forbrænding og genvinding fra slamaske (forudsat salg af varme), på 32-40 kr./kg P ved struvitudfældning og udspredning på landbrugsjord og på 54-69 kr./kg P ved struvitudfældning fra vandfaser og slamforbrænding med genvinding af den resterende fosfor fra forbrændingsasken.

Direkte anvendelse af spildevandsslam

Fosfor fra spildevandsslam, der udbringes på landbrugsjord, har en negativ markedsværdi. Selv om en række undersøgelser viser en positiv gødningsværdi af spildevandsslam, så betyder det aktuelle marked, at landmænd ofte får leveret og spredt slam på marken gratis.

Struvitproduktion

Værdien på slutproduktet fra struvitudfældning ligger på 0-3 kr./kg produkt (0-25 kr./kg P), afhængig af produktkvaliteten (Jensen et al., 2015)

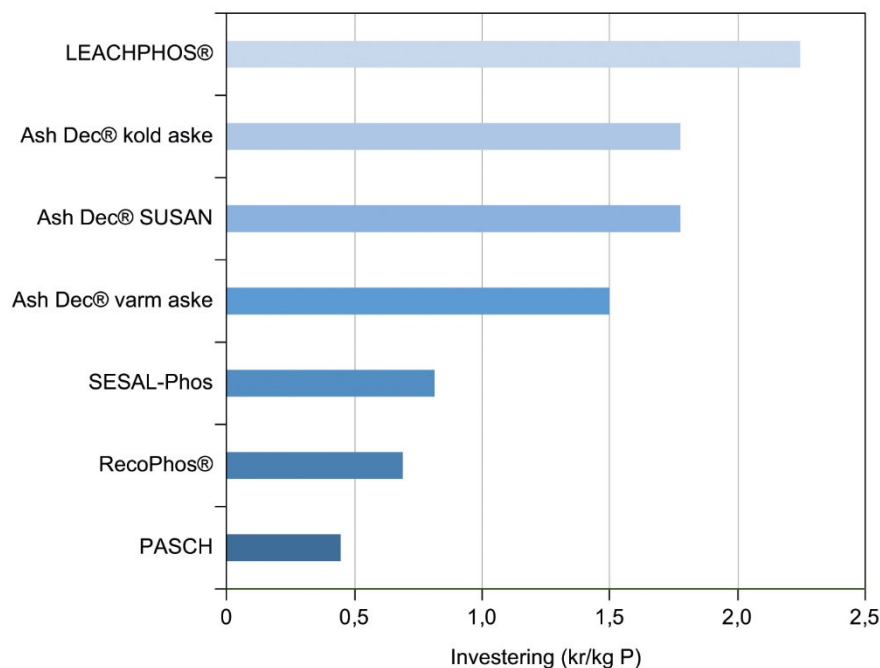
Struvitudfældning forbundet med biologisk fosforfjernelse (Bio-P) i stedet for fældningskemikalier er ifølge Thomsen et al. (2015) en økonomisk attraktiv teknologi. Implementeringen af struvitudfældning til en anlægskapacitet på ca. 100.000 PE (personenheder) koster ca. 4 mio. kr. med en tilbagebetalingstid på 4-6 år.

Fosforekstraktion fra slamforbrændingsaske

Tungmetalindholdet i slamaske gør, at det ikke kan spredes direkte på landbrugsjord. Ved slamforbrænding (monoforbrænding) findes muligheden for en separat lagring af slamasken, så asken kan tilgængeliggøres til fosforgenvinding på et senere tidspunkt. Der eksisterer en række teknologier for genvinding af fosfor til gødning fra slamasken (se afsnit 2.2.2.1.; Egle et al., 2015), som dog ikke anvendes i større stil indtil videre og pt. ikke i Danmark.

Afhængig af den valgte teknologi ligger produktionsomkostninger på slutproduktet, pr. kg af genvundet fosfor, mellem 12 kr. (fx AshDec®) og 37 kr. (fx PASCH, LEACHPHOS; Egle et al., 2014). Dette betyder, at genvinding fra slamasken under visse omstændigheder kan blive økonomisk rentabel, hvis produktionsomkostningerne ikke overstiger prisen på handelsgødning, og pristendenen fortsat peger på stigende råfosfatpriser. Som figur 2.14 viser, findes der derudover betydelige forskelle i investeringsomkostninger mellem teknologierne til fosforgenvinding fra slamaske. PASCH-teknologien har den laveste investeringsomkostning. Endvidere har en dansk rapport fra 2018 demonstreret en teknologi (Crystal-P), som er tæt på at være markedsmoden og i stand til at levere et slutprodukt til en pris på helt ned til 6,5 kr. pr kg, hvilket er under den nuværende markedspris på fosfor (Miljøstyrelsen 2018b).

Figur 2.14. Investeringsomkostninger af udvalgte teknologier til fosforgenvinding fra slamaske ved behandling af 30.000 ton aske/år (Egle et al., 2014).



2.3 Fosforværdikæder fra organisk husholdnings- og industriel bioaffald

Den totale mængde af organisk husholdningsaffald er opgjort i *Ressourcestrategien Danmark Uden Affald* (Regeringen, 2013), og der er en målsætning om, at mindst 50 %, svarende til 300.000 ton af husholdningsaffaldet, skal genanvendes i 2022. Der er mere og mere affald, som genanvendes, men hvis målet om 50 % skal nås, er det nødvendigt, at det organiske affald fra private husholdninger i højere grad indsamles separat til genanvendelse.

Når KOD komposteres, mister det som nævnt tidligere tæt på halvdelen af kvælstoffet i processen, hovedparten som ammoniak men også en del som inert N_2 . Det er det lettilgængelige kvælstof, som tabes, mens det tilbageværende kvælstof er organisk bundet. Fosfor og kalium forbliver i det komposterede materiale. Næringsstofpotentialet (også N) bibeholdes derimod, når KOD tilføres biogasanlæg, hvor også det organisk bundne N omdannes til lettilgængeligt kvælstof. Der er således flere næringsstoffer, som kan recirkuleres, hvis KOD afgasses i biogasanlæg, ligesom der vil være en energimæssig gevinst når KOD tilføres biogasanlæg i stedet for at blive komposteret.

Der findes forskellige definitioner på organisk affald, hvilket giver anledning til forskellige tal i forskellige kildematerialer (NaturErhvervstyrelsen, 2016; Gylling et al., 2016; Miljøstyrelsen 2017). Tabel 2.9 tager så vidt muligt udgangspunkt i affaldsstatistikken (2017) samt en antagelse om, at organisk affald kan stamme både fra KOD ("Husholdninger, organisk affald" i tabel 2.9) og organisk affald som en andel af dagrenovation ("Organisk fraktion af dagrenovation" i tabel 2.9). Inspireret af NaturErhvervstyrelsen (2016) og Gylling et al. (2016) er der derfor ud over madaffald ("Husholdninger, organisk affald" i tabel 2.9) beregnet et indhold af organisk affald i den fraktion, som kaldes "dagrenovation" i den danske affaldsstatistik (Miljøstyrelsen, 2017). Beregningen er foretaget ud fra en antagelse om, at 50% af affaldet i dagrenovation er organisk affald med et tørstofindhold på 50% (; Gylling et al., 2016).

I 2030 vil der være en mængde på knap 920.000 ton organisk affald (Gylling et al., 2016), og til sammenligning er der i dag en kapacitet til forbehandling af organisk affald på omkring 300.000 ton, og under 50.000 ton af kapaciteten behandler KOD (NaturErhvervstyrelsen, 2016).

Tabel 2.9. Mængder af bioaffald, indhold af kvælstof (N) og fosfor (P) og N/P-forhold (NaturErhvervstyrelsen, 2016; Miljøstyrelsen, 2018b)

Affaldsstatistik 2017 (2016)	TS(t)	N(t)**	P(t)**	N/P	% P af total
Husholdninger, organisk affald*	16170	307	37	8.3	0.4%
Husholdninger, haveaffald*	228030	1237	219	5.6	2%
Servicebranchen, organisk affald*	32010	607	72	8.4	1%
Servicebranchen, haveaffald*	40590	220	92	2.4	1%
Slam, andet	3300	-	-	-	-
Industri, organisk affald*	46860	890	108	8.2	1%
Industri, haveaffald*	1980	11	2	5.6	0.02%
Slam, andet	8910	-	-	-	-
Slam, renseanlæg [ton tørstof]	132000	6283	4131	1.5	45%
Organisk fraktion af dagrenovation [ton tørstof]*	268200	5088	617	8.3	7%
Halm og træaske***	-	-	800	-	9%
Organiske rester***	-	-	2157	-	23%
Kød og benmel kat. 2***	-	-	1000	-	11%
Total	778050		9235		100%

*57-77 % vandindhold, hvilket stemmer fint overens med en tørstofprocent på 40 for madaffald og have/park-affald (IPPC, 2006)

** Beregnet ud fra N- og P-indhold i biomasser i NaturErhvervstyrelsen (2016)

*** Sckerl (2012)

Anlæggene ligger spredt i landet: Billund, Horsens, Holbæk og Rødovre. De vigtigste selskaber til oparbejdelse af kildesorteret organisk husholdningsaffald til biopulp er Komtek A/S placeret i Holsted i Sydjylland, HCS A/S med anlæg placeret i Glostrup og NC Miljø, som også placeret i Holsted nær et biogasanlæg. Endvidere er der Marius Pedersen A/S, som indsamler bio- og madaffald fra butikker, producenter, kantiner, hospitaler og industrier.

Biopulp fremstilles gennem shredding (makulering) af organisk affald og tilsætning af vand, så at der opnås en våd masse (ca. 10-15 % TS) med en partikelstørrelse under 4-5 mm (Miljøstyrelsen, 2013).

Kapaciteten på hele Sjælland vurderes til at være maksimalt 30.000 tons, mens afsætningen til biogasanlæg på to biogasanlæg på Sjælland (Hashøj og Nysted) indtil videre har været endnu mindre. Solrød biogasanlæg er dog en mulig tredje aftager på Sjælland. En betydelig del af forbehandlingen finder sted i Jylland lige nu, og hovedparten af biopulpen fra Sjælland anvendes i dag på biogasanlæg i Jylland eller eksporteres til Sverige (NaturErhvervstyrelsen, 2016).

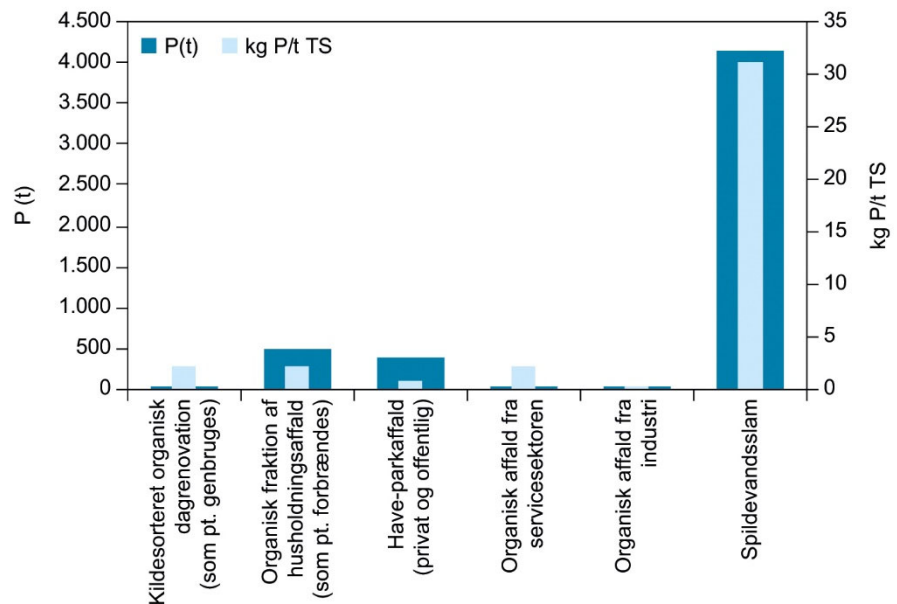
2.3.1 Forbrænding af industrielt bioaffald

Baseret på data fra affaldsstatistikken (Miljøstyrelsen, 2017) udgør fosforgenvindingspotentiallet for industrielt organisk affald mindre end 1 % af det totale fosforgenvindingspotentialt (se figur 2.15). Men som det ses af tabel 2.9, er der, ifølge brancheforeningen for genanvendelse af organiske ressourcer til jordbrugsformål (Sckerl, 2012), et bidrag fra industri, som ikke er inkluderet i affaldsstatistikken, herunder et stort potentialt i halm- og træaske på ca. 800 ton fosfor pr. år, i organiske rester fra industrien på 2.157 ton og i kød- og benmel kategori 2 på 1.000 ton. I tillæg hertil har Biofos vurderet, at 18-20.000 ton fosfor er opbevaret i deres fosforbank (Miljøstyrelsen, 2018a). Disse

mængder synes ikke at være inkluderet i Danmarks Affaldsstatistik (tabel 2.9). Potentialet for brug af kød og benmel til husdyrfoder som fosforkilde er nærmere beskrevet i kapitel 3 (Optimering af fodring af husdyr).

Træaske er optaget på økologiforordningens positivliste. Som betingelse er angivet i økologivejledningen, at træaske til enhver tid skal overholde de af Miljø- og Fødevareministeriet fastsatte grænse- og afskæringsværdier samt de gældende regler fra Naturstyrelsen og Miljøstyrelsen (tabel 2.8). Det betyder i praksis, at det er den samlede tilførsel af cadmium i askebekendtgørelsen på 0,8 g Cd/ha/år, som sætter grænser for, hvor meget træaske der kan tilføres jorden (NaturErhvervstyrelsen, 2016).

Figur 2.15. Fosforindholdet i absolutte mængder (ton P) hhv. koncentration (kg P/ton, tørstof) i forskellige affaldsstrømme (NaturErhvervstyrelsen 2016).



2.4 Potentialer på tværs af sektorer

Der er store forskelle i potentialet for genvinding af fosfor mellem affaldsstrømmene. Figur 2.15 viser de samlede tørstofmængder i diverse affaldsstrømme sammenlignet med fosforindholdet pr. ton tørstof (TS).

KOD er en interessant næringsstofkilde for økologerne, fordi KOD er på listen over ikke-økologiske gødningsstoffer og jordforbedringsmidler, der er godkendt til brug i økologisk drift, såfremt det ikke er muligt at dække gødningsbehovet (Miljø- og Fødevareministeriet, 2018). Dog kan der, som det ses af tabel 2.10, være udfordringer i forhold til kvaliteten (Slagelse Forsyning A/S, Slagelse Kommune & EnviDan A/S, 2017; Thomsen et al., 2017 og 2018). Generelt er udfordringerne at mindske tabet af de biologiske næringsstoffer og mindske recirkuleringen af mikroforureninger.

Tabel 2.10. Eksempler på tungmetaller og miljøfremmede stoffer i udrådnat slam og udrådnat KOD*. TS: tørstof, TP: total fosforindhold.

	Udrådnat slam**	Udrådnat biopulp*** % af grænseværdi	Resulterende biogødning
Bly, Pb (mg/kg TS)	33	25	31
Bly, Pb (mg/kg TP)	10	30	11
Cadmium, Cd (mg/kg TS)	125	125	125
Cadmium, Cd (mg/kg TP)	40	100	43
Krom, Cr (mg/kg TS)	30	30	30
Kobber, Cu (mg/kg TS)	30	10	25
Nikkel, Ni (mg/kg TS)	67	67	67
Nikkel, Ni (mg/kg TP)	24	80	27
Zink, Zn (mg/kg TS)	20	8	17
Kviksølv, Hg (mg/kg TS)	125	38	102

*Slagelse Forsyning A/S, Slagelse Kommune & EnviDan A/S (2017)

**Data på udrådnat slam er gennemsnitsværdier for analyser fra hele 2015 fra 10 danske rensesanlæg.

***Data på udrådnat biopulp er gennemsnitsværdier for 3 analyser af KOD biopulp, som er justeret ift. en simuleret udrådning.

2.4.1 Barrierer

I dag genanvendes omkring 65 % af den slam, som produceres på de danske rensesanlæg på landbrugsjord, mens omkring 9 % komposteres og anvendes i anden gødning (Miljøstyrelsen, 2018b). I Danmark går 26 % af slammet til forbrænding. En nylig opgørelse (van Dijk et al., 2015) har vist, at ca. 35 % af det samlede tab af fosfor som ressource i Europa stammer fra spildevandsslam. For at mindske fosfortabet er der et stort behov for teknologier til genanvendelse af fosfor fra aske fra monoforbrænding af slamaske, og mange forskellige kemiske teknologier og pyrolyse til termisk behandling af slammet er under udvikling.

Produktion af struvit ved hhv. ekstraktion af fosfor fra spildevand (Pizzol et al., 2014; Thomsen et al., 2015) og fosforekstraktion fra forbrændingsaske (Miljøstyrelsen, 2018b) er markedsmodne teknologier. Fosforprodukter herfra vil under de rette forhold kunne udgøre en stigende markedsandel med mulighed for eksport. Produkterne har en meget høj kvalitet (veldefineret sammensætning og lavt indhold af tungmetal) sammenlignet med de organiske gødningsprodukter.

Separat deponering af aske fra slamforbrænding, uden at den blandes med asken fra øvrig affaldsforbrænding, åbner muligheden for etablering af "fosforbanker", hvorfra fosfor kan genvindes på et senere tidspunkt (se Miljøstyrelsen, 2014). P.t. ligger der fx ca. 18-20 kt fosfor fra forbrænding af industriel bioaffald i fosforbanker hos Biofos (Miljøstyrelsen, 2018a). Produktionsomkostningerne er stærkt afhængige af, om slamasken blandes sammen med asken fra forbrænding af fx dagsrenovation, hvilket gør oparbejdning af fosfor fra asken betydeligt dyrere pga. de stærkere bindingsegenskaber af askeblandingen. Selv om en fosforkoncentration svarende til råfosfat af lav kvalitet (ca. 1,5-2 % P) kan opnås med blandet aske, er genvinding fra blandet aske p.t. subøkonomisk (Lederer et al., 2014). En separeret lagring af slamaske i

fosforbanker er dermed en forudsætning for at få genvindingsomkostningerne fra fosforbanker ned.

Gødningsværdi

Fosforet i alle produkter beskrevet i denne rapport forventes at have en vis fosforgødningsværdi selv for den førstkommande afgrøde.

For de produkter, der har en lidt lavere gødningsværdi i første vækstsæson, forventes fosforet at blive frigivet til jorden over tid og dermed komme efterfølgende afgrøder til gode. For mange produkter er gødningsværdien på højde med handelsgødning, selv for den førstkommande afgrøde. Alle de beskrevne produkter er derfor velegnede fosforgødningskilder, og de kan alle bidrage til at vedligeholde fosforstatus på de jorder, der har en god fosforstatus allerede. De produkter, som har en lidt lavere gødningsværdi til førstkommande afgrøde, fordi fosforfrigivelsen er langsommere, bør dog anvendes med omtanke på jorde med lav fosforstatus og til afgrøder med særlige behov for fosfor i form af startgødskning, fx majs.

Gødningsværdi af fosfor i restprodukter har været emnet for et nyligt afsluttet GUDP-projekt. Resultaterne fra dette projekt er publiceret i en DCA-rapport (Rubæk et al., 2018).

2.5 Opsummering og perspektivering

Den vigtigste kilde til fosfor i dansk planteproduktion er husdyrgødning, hvoraf hovedparten udbringes direkte på landbrugsjord. En stigende andel af husdyrgødningen tilføres biogasanlæg, hvor det anvendes sammen med organiske affaldsressourcer, og de husdyrgødningsbaserede biogasanlæg spiller således en meget vigtig rolle i håndtering af næringsstoffer fra landbrug og det øvrige samfund.

De store mængder affaldsressourcer, der kan recirkuleres via biogasanlæggene, udgør en økonomisk gevinst for biogasanlæggene og kan potentielt udgøre en miljømæssig gevinst for samfundet, såfremt næringsstofferne i bioaffaldsressourcen i det afgassede produkt udnyttes optimalt. Recirkulering af mikroforureninger i madaffald kan udgøre en barriere for kvaliteten af gødningsproduktet (tabel 2.8 og tabel 2.10), som dog vil kunne løses ved efterbehandling af det afvandede digestat med eksisterende pyrolyseteknologi (fx GreenAqua).

Biogasanlæg er en forudsætning for, at ressourcerne i mange affaldsprodukter kan komme til genanvendelse, og næringsstofferne kan udnyttes på landbrugsjorden. Alternativt skal slagterier m.m. investere i hygiejniseringsanlæg, ligesom der er restriktioner i anvendelsen af slagteriaffald (se 3.3.4). Der er en potentiel miljømæssig gevinst for samfundet ved at recirkulere og fordele fosfor fra affaldsressourcerne via biogasanlæggene, såfremt de rette teknologier til sikring af kvaliteten af gødningsværdi, renhed samt minimering af NH_3 , N_2O og CH_4 benyttes (Nielsen et al., 2019a,b; Thomsen, 2016; Thomsen et al., 2012, 2015, 2019) (tabel 2.8)). Såfremt alt bioaffaldet skal samudrådnese på de gyllebaserede biogasanlæg, kræves det, at bioaffaldet transporteres over store afstande (fra Sjælland til Jylland). Eftersom de fleste biogasanlæg ligger i husdyrintensive områder, hvor der i forvejen er tilstrækkeligt fosfor via husdyrgødningen, skal næringsstofferne i det afgassede materiale (gylle, landbrugs- og industrielt organisk affald og madaffald) efterfølgende transporteres tilbage til områder med lav husdyrintensitet (Sjælland).

Der findes en række teknologier, der kan opkoncentrere fosfor således, at den mængde, der skal transporteres, kan reduceres. Det vurderes, at specielt skruepresser og dekantercentrifuger vil være de mest omkostningseffektive teknologier. Opkoncentreringen af fosfor med skruepresser er imidlertid begrænset, og skruepresser er kun velegnede, hvis det er en mindre del af fosforet, der skal eksporteres. Herudover antages det, at det afgassede produkt lever op til gældende regulering for anvendelse af affald til jordbrugsformål, hvilket bør analyseres mere dybdegående (jf. tabel 2.8 og 2.10)

Det skal også nævnes, at det afgassede fosforrige produkt bør tilbagetransporteres til de ikke-husdyrintensive områder af Danmark for at sikre en forbedret fordeling af fosfor i Danmark. I princippet skal der derfor transporteres fosfor fra vest til øst for at skabe en bedre fordeling af fosfor i Danmark og ikke omvendt. Alt i alt er kvaliteten af slutproduktet og et eventuelt behov for yderligere behandling før udbringning på landbrugsjord noget, som bør undersøges nærmere.

Der er udført en række beregninger for opkoncentrering og transport af fiberfraktionen med brug af dekantercentrifugering. Fiberfraktionen vil kunne produceres og transporteres ca. 80 km, inden udgiften overstiger nettoværdien af næringsstoffer til planteproduktion. Tilsvarende vil ikke-separeret husdyrgødning kunne transporteres ca. 50 km og samtidigt medføre væsentligt større vejtransport og energiforbrug. Hvis transporten af fiberfraktion og husdyrgødning primært sker med henblik på at reducere et fosforoverskud, og det samtidigt forventes, at modtageren ikke betaler den beregnede værdi af næringsstoffer, vil det være langt billigere at separere og transportere fiberfraktionen i forhold til transport af flydende afgasset materiale. Ved en afstand til aftagerne på 50 km vil det således koste 18 og 42 kr./kg P med hhv. fiberfraktion og flydende afgasset gødning. Der er foretaget beregninger på, at den afgassede fiberfraktion fra en dekantercentrifuge vil have en værdi på 153-183 kr./ton i marken. Til trods for en betydelig værdi er produktionen og afsætningen af denne afgassede fraktion imidlertid en omkostning for biogasanlæggene, der typisk afholder hele udgiften. Det skyldes de aktuelle markedsforhold omkring afsætning af alternative gødningskilder. Biogasanlæggene har således i dag en samlet udgift på op til 20 kr. pr. kg fosfor, der skal afsættes til planteavlere ved afstande på op til 100 km. Hvis der skal transporteres fosfor over større afstande, eksempelvis mellem Jylland og Sjælland, vil denne udgift være ca. 30 kr./kg P. Flytning af fosfor med fjerkrægødning kan gøres uden store omkostninger til separation, og fosfor og de øvrige næringsstoffer vil kunne betale transport over større afstande. Fosfor i fjerkrægødning kan derfor konkurrere med handelsgødning, selv når det skal flyttes mere end 100 km.

Omkostningen til afsætning af fosfor i spildevandsslam er på ca. 45 kr./kg P, som udelukkende dækker transport og betaling fra modtageren af slammet. Samlet set er der således store udgifter forbundet med recirkuleringen af fosfor fra såvel gyllebaserede biogasanlæg som slambaserede anlæg til trods for den værdi, som fosforet i produkterne principielt repræsenterer, men som pt. ikke værdisættes tilstrækkeligt af modtagerne. På trods af de stigende mængder fosfor, der vil blive recirkuleret fremover, er der umiddelbart ikke noget, der tyder på, at tilliden til affaldsbaserede gødningsprodukter vil ændre sig. Recirkulering ved produktion af uorganiske gødningsprodukter, der er hhv. udfældet fra vandfasen og genvundet fra slamforbrændingsaske, er alternative løsninger, hvor produkterne erstatter allerede eksisterende mineralske handelsgødningsprodukter. Selv ved markedsmodne teknologier og priser løser dette dog ikke udfordringerne omkring behovet for flytning af overskud

af fosfor fra vest til øst Danmark. Udgiften til recirkulering af fosfor kan reduceres ved at etablere lokale biogasanlæg til kombineret biogas- og gødningsproduktion fra lokale fosforholdige affaldsprodukter. På den måde undgår man at transportere organisk affald fra regioner med et behov for fosfor til områder med et fosforoverskud for derefter at transportere det bioforgassede materiale tilbage til områder med fosforunderskud (lav husdyrintensitet). Med biopulptechnologien er der skabt mulighed for en produktion af biogødning på lokal-skala. Forbehandlingskapaciteten på Sjælland er dog stadig for lille til de samlede mængder af KOD. Biopulptechnologien tillader samudrådning af madaffald fra husholdninger på lokale biogasanlæg inden for såvel som uden for landbrugssektoren (fx på slambaserede biogasanlæg).

Tabel 2.11 og 2.12 opsummerer teknologisk modenhed (det vil sige umiddelbar anvendelighed) og omkostninger forbundet med forskellige teknologier og strategier i forhold til opkoncentrering, fordeling og recirkulering af fosfor. I forhold til husdyrgødning (tabel 2.11) fremgår det, at direkte udbringning af ubehandlet gylle, afgasset biomasse og fjerkrægødning giver en betydelig økonomisk gevinst i forhold til anvendelse af fosfor i handelsgødning, da der samtidigt tilføres andre næringsstoffer. For de flydende gødninger kræves en lokal anvendelse (<20 km), mens fjerkrægødning kan transporteres relativt langt og samtidigt være et billigt alternativ til anvendelse af handelsgødning pga. fjerkrægødningens høje tørstofindhold. Ved separation af gylle og opkoncentrering af fosforen i en fast fraktion samt efterfølgende transport (100 km) er der en negativ værdi i forhold til handelsgødning, hvilket betyder, at der ikke er et økonomisk incitament til en sådan løsning.

I forhold til affald inkl. spildevandsslam (tabel 2.12) vurderes en række teknologier til behandling i forhold til teknologisk modenhed (det vil sige umiddelbar anvendelighed), gødningsværdi samt omkostninger ved fremstilling af det endelige gødningsprodukt. Det har ikke været muligt at vurdere omkostningerne på alle fraktioner i tabel 2.12, men hvor det har været muligt, ligger omkostningerne pr. kg fosfor væsentligt over omkostningerne forbundet med brug af handelsgødning (ca. 12 kr. pr. kg fosfor) og frasepareret fosfor i gylle. Det er værd at bemærke, at omkostningerne ved struvit-fremstilling er omtrent af samme størrelsesorden som omkostningerne ved at udbringe spildevandsslam. Da struvit modsat spildevandsslam desuden har en vis markeds-værdi, er der her et potentiale for en mere rentabel udnyttelse af fosforressourcen i spildevandsslammet.

Tabel 2.11 Opsummering af strategier og værdikæder for fosforrecirkulering fra husdyrgødning. Kvalitative vurderinger fra "– –" (dårligst) til "+++" (bedst) efter forfatternes skøn. Gødningsværdi er regnet med handelsgødningspriser som referencer og anslåede gødningsværdi i marken. Omkostninger dækker lagring, udbringning, transport, produktion og afsætning af fiber. Nettoværdi er gødningsværdi af kvælstof, fosfor og kalium fratrukket omkostninger, hvor positive værdier betyder, at der er en gevinst i forhold til at bruge fosfor fra handelsgødning, mens negative værdier betyder, at det er dyrere end at anvende handelsgødning.

	Teknologisk mod-værdi (1. år) i slutproduktet*		Forureninger	N/P-forhold	Gødningsværdi	Omkostninger	Nettoværdi	Regulatoriske barrierer
Handelsgødning	+++	+++	++ (tungmetaller)	Ca. 15-20	12 kr./kg P	Stigende pris: >12 kr./kg P	0 kr./kg P	COM (2016) 157 (Forslag til forordning om fastsættelse af regler om tilgængeliggørelse på markedet af CE-mærkede gødningsprodukter)
Direkte udbringning af flydende husdyrgødning (10 km transport)	+++	+++	++ (tungmetaller)	Ca. 2-7.	57 kr./ton	30 kr./ton (22 kr./kg P)	27 kr./ton (23 kr./kg P)	Bekendtgørelse om erhvervsmæssigt dyrehold
Direkte udbringning af fjerkrægødning (100 km transport)	+++	+++	++ (tungmetaller)	Ca. 3,3.	262 kr./ton	112 kr./ton (15 kr./kg P)	150 kr./ton (20 kr./kg P)	Bekendtgørelse om erhvervsmæssigt dyrehold
Bioforgasning af husdyrgødning, organisk husholdningsaffald (biopulp) og industrielt bioaffald	+++	+++	++ (tungmetaller)	Ca. 5-10.	57 kr./ton	30 kr./ton 22 kr./kg P	27 kr./ton (23 kr./kg P)	Bekendtgørelse om erhvervsmæssigt dyrehold
Direkte udbringning af husdyrgødning (100 km transport)	+++	+++	++ (tungmetaller)	Ca. 2-7	57 kr./ton	74 kr./ton (64 kr./kg P)	-17,2 kr./ton (-14,3 kr./kg P)	Bekendtgørelse om erhvervsmæssigt dyrehold
Bioforgasning og separation (fast fraktion, 100 km transport)	++	+++	++ (tungmetaller)	Ca. 1-2 i faste, 5-25 i flydende	160 kr./ton	175 kr./ton (15 kr./kg P)	-15 kr./ton (-1,5 kr./kg P)	Bekendtgørelse om erhvervsmæssigt dyrehold

* I forhold til forureninger betyder "+++" lavt indhold. Tungmetaller er nævnt, hvor de kan udgøre hovedproblemet.

Tabel 2.12. Opsummering af strategier og værdikæder for fosforrecirkulering fra visse typer spildevand og husholdnings-/industrielt bioaffald. Kvalitative vurderinger fra "– – –" (dårligst) til "+ + +" (bedst) efter forfatterens skøn. Omkostningerne er udgiften forbundet med prisen for fremstilling af det endelige gødningsprodukt. I forhold til direkte udbringning af spildevandsslam er transportomkostninger inkluderet i omkostningsberegningen

		Teknolo-	Gødningsværdi	Forureninger i slut-N/P-for-	Omkostninger	Regulatoriske barrierer
		gisk mo-(1. år) af pro-	duktet	produktet*	hold	
Direkte udspreddning af spildevandsslam	+++	+ / ++ (afhænger af anvendelse af kemisk eller biologisk P-fjernelse)	+	Størstedelen af slammet opfylder kravene i affald-til-jord-bekendtgørelsen	Ca. 1,5 – 45 kr./kg P i slam	Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål
Bioforgasning af spildevandsslam og udbringning på mark	+++	++	+	(tungmetaller)	Ca. 1,5 – –	Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål
Bioforgasning af spildevandsslam sammen med biopulp fra organisk husholdningsaffald	+++	++	+	(tungmetaller)	Ca. 2-8 –	Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål
Mineralisering af spildevandsslam	+++	+/++	++	Tungmetaller (mindre niveau af organiske mikroforurenninger end ved direkte udspreddning)	Ca. 1,5 –	Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål
Forbrænding af slam og P-ekstraktion fra slam-aske	+	+++	+++	Fjernelse af op til 99% af tungmetallindhold (fx AshDec)	Ca. 1,5 – Ca. 74 kr./kg P i slam (12-37 kr./kg P i slutprodukt)	Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål
					Begrænset markedsmodenhed	
					–/+ Teknologi er markedsmoden	
Biologisk P-fjernelse og struvituddædning	++	++/+++ (Bio-P)	+++		Ca. 1,5 32-40 kr./kg P i slam (54-69 kr./kg P ved efterfølgende forbrænding og P-ekstraktion fra aske)	Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål
Forbrænding af industrielt bioaffald og P-ekstraktion fra aske	+++	+++	+++?	(afhængig af teknologien)	Ca. 5,9 + Teknologi er (tæt på) markedsmoden	Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål
Bioforgasning og kompostering af organisk husholdningsaffald (KOD)	+++	++	+/++	Lav P-indhold i organisk husholdningsaffald, dermed risiko for højt Cd/P-forhold	Ca. 8,3 +	Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål

* I forhold til forureninger betyder "+++ " lavt indhold. Tungmetaller er nævnt, hvor de kan udgøre hovedproblemet.

I denne rapport gennemgås en række strategier og tekniske løsninger, der kan være med til at øge recirkuleringen af den nationale fosforressource. Inden man lægger sig fast på en bestemt strategi, er det dog vigtigt at overveje, hvilke konsekvenser og sideeffekter der er forbundet med de enkelte løsninger, idet der kan være negative sideeffekter for fx miljø og klima ved nogle af de beskrevne tiltag, som det kan være nødvendigt at håndtere. Fx vil en øget transport af gødning / affald som følge af ønsket om en bedre omfordeling af fosforressourcen resultere i et øget CO₂-udslip. Ligeledes er der ved bioforgasning og kompostering af affald en emission af lattergas og ammoniak, der forøges, hvis mængden af gødning / affald, der behandles, forøges. Dette problem kan håndteres ved fx at separere den afgassede gylle, hvorved ammoniakfordampningen ved udbringningen mindskes, eller ved at lade komposteringen forgå i lukkede haller med luftrensning. Ligeledes kan der være udfordringer i forhold til opkoncentrering af tungmetaller og andre uønskede stoffer. Disse udfordringer vil kunne løses ved efterbehandling af det bioforgassede materiale til et produkt med et lavere indhold af problematiske mikroforureninger.

Det er derfor vigtigt, at der foretages en samlet konsekvensanalyse, hvor disse elementer inddrages og kvantificeres, inden man beslutter sig for at implementere de beskrevne strategier og teknologiske løsninger i praksis.

3. Optimering af fodring af husdyr – således at udnyttelsen af fosfor øges og udskillelsen reduceres

3.1 Indledning

Med vedtagelsen af den nye fosforregulering og indførslen af lofter for den mængde fosfor, der må tilføres pr. ha, er der kommet fornyet fokus på, hvordan der skabes en bedre balance mellem fosfor og kvælstof i husdyrgødningen. Det skyldes, at det nu er blevet fosfor, der nogle steder er blevet den begrænsende faktor for den mængde husdyrgødning, der må tilføres pr. ha. Behovet for at reducere fosforindholdet i husdyrgødning er imidlertid ikke ens for alle husdyrproduktioner og afhænger også af, hvor bedriften er placeret geografisk, idet alle områder i Danmark ikke er lige udfordret med hensyn til fosfor. Forholdet mellem kvælstof og fosfor i husdyrgødningen er ikke ens for alle husdyrarter, men varierer en del. Dette har bl.a. betydning for, hvordan husdyrgødningen kan anvendes til gødsning, biogas mv.

Kapitel 3 beskriver først de funktioner, som fosfor har som livsnødvendigt næringsstof til sikring af husdyrenes sundhed, velfærd og produktion og den aktuelle udnyttelsesgrad og udskillelse af fosfor med husdyrgødningen. Dernæst beskrives årsager til den lave fosforudnyttelse, og hvilke muligheder og barrierer der er for at øge udnyttelsen og reducere udskillelsen af fosfor via fodringen for de enkelte produktionsgrene, idet muligheder og barrierer er meget forskellige for de enkelte husdyrarter. Kapitlet afsluttes med en oversigt, hvor muligheder og barrierer er vægtet, så det vil være muligt at fokusere på relevante afhjælpende tiltag alt efter, hvor strenge fosforkravene er i det pågældende område.

3.2 Fosfor – et livsnødvendigt næringsstof til husdyr

Fosfor er et livsnødvendigt næringsstof for alle levende organismer, og tilførsel af fosfor med foderet er nødvendigt for at sikre sundhed, velfærd og produktion hos husdyr. Fosfor indgår i mange sammenhænge i dyrene og er fx stærkt involveret i energiomsætning, vækstprocesser, knogleopbygning og -dynamik for at nævne nogle enkelte nøglefunktioner. Manglende tilførsel af fosfor kan derfor påvirke dyrenes produktion, sundhed og velfærd negativt. Nedsat tilvækst og produktion er de første tegn på fosformangel, mens manglende knogleudvikling og -mineralisering ses efterfølgende. Ved langvarig mangel på fosfor kan dyrene udvikle 'bløde' og deforme knogler. Da fosformangel giver knoglebrud (Foto 1) og nedsat produktion, har der i de seneste mange årtier været fokuseret på, at husdyrene ikke skulle mangle fosfor. De grundlæggende funktioner og omsætningsmekanismer for fosfor hos husdyr er nærmere beskrevet af Poulsen & Rubæk (2005) og vil ikke blive beskrevet her.

Foto 1. Husdyrenes fosforbehov skal dækkes, ellers kan det gå rigtig galt. Knoglebrud som følge af fosformangel.



Da husdyrenes præcise behov for fosfor og andre næringsstoffer ikke var kendt, var det tidligere almindeligt at anvende en betydelig sikkerhedsmargen, når foderets sammensætning og indhold af fosfor og andre næringsstoffer blev optimeret. Der var især mangel på viden om: (i) husdyrenes fysiologiske behov for fosfor i de forskellige livsfaser og (ii) fosfors tilgængelighed (fordøjelighed) i foder og de enkelte foderstoffer. Tidligere var der også mangel på sikker viden om det totale indhold af fosfor i foderstofferne, men selv om der kan være analysetekniske udfordringer (se 3.5.3), er viden til rådighed i dag. Vidensgrundlaget er udvidet markant gennem de seneste årtier, men der er fortsat områder, hvor man med forbedret viden vil kunne fodre husdyrene på en mere præcis måde. Der er således fortsat behov for forskning i husdyrenes fysiologiske fosforbehov under hensyntagen til produktivitet og foderforbrug (fodereffektivitet), som fortsat ændres i takt med bl.a. den genetiske fremgang gennem avlsarbejdet. Det er derfor vigtigt, at foderets indhold af fordøjeligt fosfor er nøje afstemt ift. dyrenes foderoptagelse. Det er noget, der fokuseres mere og mere på, idet dyr med et højt foderforbrug (og dermed lav foderudnyttelse) ikke skal have foder med samme fosforkoncentration som dyr med et lavere foderforbrug (og dermed høj foderudnyttelse). Viden om, hvordan foderets koncentration tilpasses til dyrenes foderoptagelse, er nødvendig for at kunne nedsætte udledningen af fosfor uden at risikere fosformangel hos dyrene. Vidensbehovet omkring det fysiologiske behov og tilgængelighed er dog ikke lige stort hos alle husdyrarter og -kategorier. Disse forhold vil blive omtalt nærmere i de efterfølgende afsnit.

3.3 Aktuel tilførsel, udnyttelse og udskillelse af fosfor hos danske husdyr pr. enhed og på landsplan

Gennem optimeringen af foderet sikres det, at husdyrene får tilført den mængde fordøjeligt (tilgængeligt) fosfor, som er nødvendig for at opfylde deres behov. Den mængde fosfor, der derimod er ufordøjeligt, udskilles med den faste gødning. Andelen af foderets fosforindhold, der ender i gødningen pga. ufordøjelighed, er ikke konstant hverken inden for husdyrart og heller ikke mellem husdyrarter. Derfor fokuseres der også i dag meget på, at fordøjeligheden af fosfor i foderet generelt skal være så stor som muligt, således at mængden af ufordøjeligt fosfor tilsvarende bliver så lille som muligt. Det betyder, at udnyttelsesgraden af fosfor er steget over årene, i takt med at vidensniveauet om, hvordan fordøjeligheden kan øges, er steget.

Hvert år gennemføres beregninger af, hvor meget fosfor der udskilles med gødningen fra de forskellige husdyrarter og kategorier, og de etablerede værdier (normtal for husdyrgødning) bruges derefter i bl.a. gødskningsplanlægningen, ligesom værdierne bruges til at følge udviklingen i husdys fosforudnyttelse og -udskillelse. En oversigt over normtallene for bl.a. fosfor findes på hjemmesiden (<http://anis.au.dk/normtal/>), og tabel 3.1 viser den beregnede aktuelle udnyttelse og udskillelse af fosfor fra forskellige husdyrarter og -kategorier. Tabellen viser endvidere det beregnede N:P-forhold (*ab dyr*), dvs. før modregning af tab af ammoniak under opstaldning og lagring af husdyrgødningen.

Tabel 3.1. Indtag, udskillelse og udnyttelse af fosfor for udvalgte husdyrarter og -kategorier samt N:P-forholdet – alle værdier er beregnet og angivet *ab dyr* (Poulsen, 2014-2017).

Husdyrart/-kategori	Tilført med foder, kg	Aflejret, kg	Udskilt med gødning, kg	Beregnet udnyttelse, %	N:P-forhold
1 årssø inkl. grise til fravænning	6,88	1,86	5,02	27	4,8
1 smågris (frav. – 32 kg)	0,24	0,12	0,12	49	4,0
1 slagtegris (32 – slagtning)	1,07	0,44	0,64	41	4,5
1 årsko, tung race	31,7	10,5	21,2	33	7,1
1 årsopdræt, tung race, 6 mdr. -	8,46	1,89	6,57	22	7,7
1 ungtyr, tung race	5,18	1,51	3,67	29	6,4
1000 slagtekyllinger, 35 d, konv.	18,3	7,0	11,3	38	4,2
1000 kyllinger (63 d., øko.)	34,9	7,1	27,8	20	3,9
100 årshøner (ægl., fritgående)	21,8	4,3	17,5	20	4,6
1 årstæve inkl. hvalpe (mink)	0,99	0,07	0,92	7	6,4

Tabellen viser, at udnyttelsen af fosfor varierer meget mellem de forskellige husdyrarter og -kategorier. Ung- og slagtegrise har den højeste udnyttelsesgrad med 49 og 41 % af det fosfor, der gives med foderet, mens udnyttelsen hos kødkvæg og opdræt ligger noget lavere på 22-29 %. Konventionelle slagtekyllinger udnytter 38 % af den tilførte fosformængde, mens udnyttelsen af fosfor er markant lavere hos økologisk opdrættede slagtekyllinger (20 %), så udskillelsen bliver omkring 2,5 gange så stor pr. kg tilvækst i økologisk sammenholdt med konventionel produktion. De reproducerende dyr har generelt en lavere udnyttelse end ikke-reproducerende husdyr af samme art, hvor malkekøer udnytter omkring 33 %, søer 27 % og høner 20 % af det tilførte fosfor. Mink har den markant laveste udnyttelse af fosfor (7 %) af alle arter og kategorier.

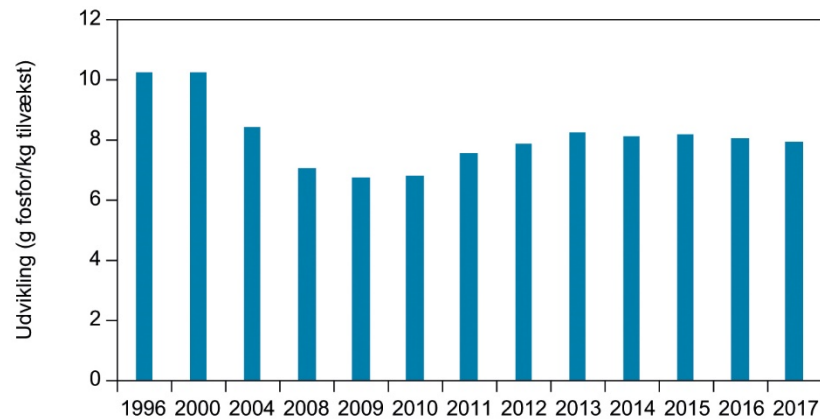
N:P-forholdet er beregnet og vises på basis af *ab dyr*-udskillelsen af kvælstof og fosfor, og det fremgår af tabel 3.1, at der er stor forskel mellem dyrearter. De højeste forhold ses generelt hos drøvtyggerne og mink (6,4-7,1), mens forholdet er væsentlig lavere hos grise og fjerkræ (3,9-4,8). Det skal nævnes, at N:P-forholdet bliver mindre, når tabet af N (ammoniak i stald og under lagring) bliver indregnet (dvs. N:P *ab lager* (se også 2.1.3)).

Gennem årene er udskillelsen af fosfor fra husdyrene blevet reduceret markant gennem forskellige tiltag såsom mindsket foderforbrug (forbedret fodereffektivitet) og gennem ændringer af fodringen. Eksempelvis er udskillelsen over de seneste 25-30 år blevet mere end halveret hos slagtegrise målt pr. kg tilvækst (Poulsen et al., 2013). Denne tidlige indsats hos slagtegrise medfører for det første, at der allerede er reduceret meget i udskillelsen af fosfor, og samtidig at potentialet for yderligere reduktion bliver relativt mindre hos slagtegrise sammenlignet med andre husdyrproduktioner, hvor der ikke har været en så tidlig fokusering på udskillelsen af fosfor. Størrelsen af den nugældende udnyttelse

og udskillelse har derfor afgørende betydning for vurdering af det aktuelle potentiale for at mindske udskillelsen af fosfor (se senere).

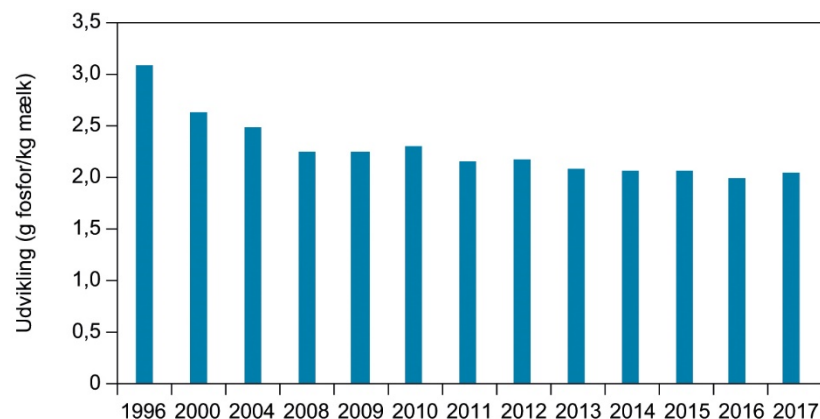
I de efterfølgende figurer er vist de seneste års udvikling sammenholdt med år 1996, 2000 og 2004 og angivet pr. kg tilvækst hos slagtegrise (figur 3.1), pr. kg produceret mælk hos malkekøer (figur 3.2) og pr. kg tilvækst for slagtekylinger (konventionelle, 35 dages produktionstid) (figur 3.3) (Poulsen & Kristensen, 1997; Poulsen et al., 2001; Poulsen, 2004-2017)

Figur 3.1. Udviklingen i udskillelsen af fosfor, g pr. kg tilvækst hos slagtegrise (*ab dyr*).



Figuren viser, at udskillelsen pr. kg tilvækst er faldet med omkring 23 % hos slagtegrise i perioden 1996 til 2017, selv om vægten ved slagtning er steget med ca. 13 %, hvilket alt andet lige ellers ville have medført en svag stigning. Det fremgår, at indholdet faldt meget i de første år efter opstarten af Vandmiljøplan III i 2005, hvorefter der er sket en stigning. Fosforudskillelsen fra slagtegrise faldt markant i det seneste årti, før etableringen af Vandmiljøplan III, hvilket vurderes at være den væsentligste årsag til, at der aktuelt ses en stagnering i udskillelsen af fosfor. Det skal nævnes, at der var problemer med den praktiske anvendelse af mikrobiel fytase som erstatning for foderfosfat hos grise og fjærkræ i årene omkring 2008-2010, hvilket formentlig er den væsentligste årsag til den stigning, der ses i udskillelsen i 2011-13 (figur 3.1). Aktuelt er der stort fokus på at få nedbragt foderforbruget pr. kg tilvækst hos slagtegrise, ligesom brugen af større doseringer med mikrobiel fytase er stigende (afsnit 3.4.6). Derfor forventes det, at udskillelsen af fosfor pr. kg tilvækst falder igen over de kommende år hos slagtegrise.

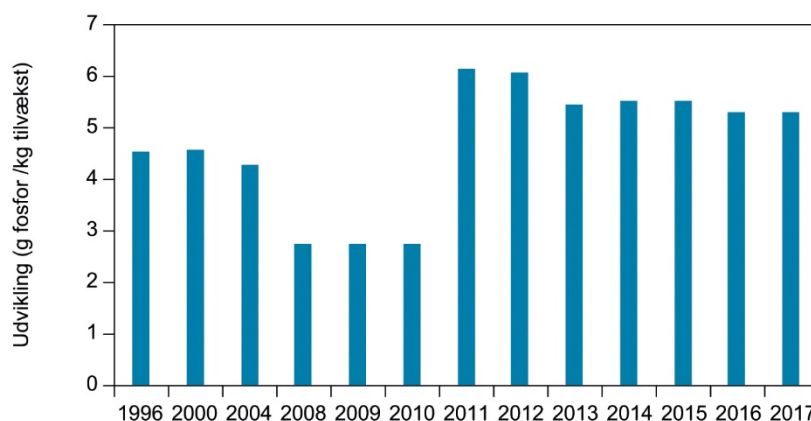
Figur 3.2. Udviklingen i udskillelsen af fosfor pr. kg produceret mælk hos malkekøer (*ab dyr*).



Det fremgår af figur 3.2, at udskillelsen af fosfor pr. kg produceret mælk er faldet med omkring 33 % i perioden 1996 til 2017. I samme periode er mælkeydelsen pr. ko steget med 40 % fra 7.450 til 10.410 kg/ko/år (Poulsen et al., 1997; Poulsen, 2004-2017). I perioden 2008 til 2017 er udskillelsen af fosfor pr. årsko steget med omkring 2 %, mens mælkeydelsen er steget 13 %. De seneste års data kunne dog tyde på, at udskillelsen pr. kg produceret mælk er stagnerende og måske svagt stigende som følge af de foderstoffer, der bruges ved sammensætningen af foderet (se afsnit 3.5.7).

Det fremgår af figur 3.3, at der i årene efter iværksættelsen af Vandmiljøplan III i 2005 skete et kraftigt fald i udskillelsen af fosfor pr. kg tilvækst hos slagtekyllinger. Dette fald skyldes øget brug af mikrobiel fytase som erstatning for foderfosfat og øget viden om kyllingers fosforbehov. Tilsyneladende skete der efter 2010 en stor stigning i udskillelsen af fosfor/kg tilvækst hos slagtekyllinger. Stigningen er dog ikke reel, men skyldes nye grunddata vedr. aflejringen af fosfor hos slagtekyllinger. Aflejringen af fosfor viste sig at være væsentlig lavere pr. kg tilvækst, end hvad de tidligere data viste (Steenfeldt & Poulsen, 2012). Den beregnede udskillelse af fosfor i alle årene før 2011 har derfor formentlig været for lav. Figuren viser, at udskillelsen af fosfor pr. kg tilvækst er faldet med knap 14 % siden 2011.

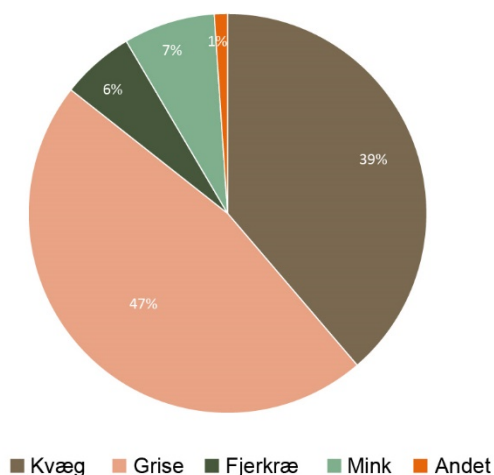
Figur 3.3. Udviklingen i udskillelsen af fosfor, g pr. kg tilvækst hos slagtekyllinger (35-dages produktions-tid), *ab* dyr.



Den samlede mængde af fosfor i husdyrgødningen i Danmark er beregnet til omkring 43.000 ton for 2017 (Poulsen, 2019), og fordelingen på husdyrproduktioner er vist i figur 3.4. Det fremgår, at 47 % af den totale mængde fosfor, der findes i husdyrgødningen i Danmark, stammer fra produktionen af grise, mens kvægsektoren bidrager med 39 %. Fjerkræ og mink bidrager med 6 og 7 %, mens 1 % stammer fra heste, får og geder.

Figur 3.4. Procentuel fordeling af fosfor i husdyrgødning på husdyrarter i 2017.

Fordeling af fosfor i husdyrgødning på husdyr (%)



3.4 Muligheder og udfordringer

Overordnet er mulighederne for at øge udnyttelsen og dermed mindske husdyrenes udskillelse af fosfor via fodring er knyttet til to spor: (i) forøgelse af fordøjeligheden af fosfor i foderstofferne og (ii) forbedret tilpasning af foderets indhold af fordøjeligt fosfor til dyrenes aktuelle behov. Det er her, at potentialet, men også udfordringerne ligger. De to spor knytter sig til to faktorer: (i) forbedringer i fodringen gennem øget viden om behov, fytase og management samt (ii) avlsfremgang og samspillet mellem de to faktorer, som vist i figur 3.5.

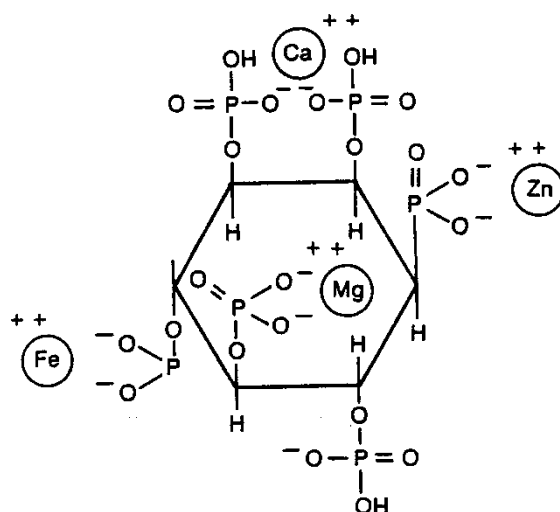
Figur 3.5. Samlet oversigt over mulige specifikke fodringsmæssige muligheder for at reducere udskillelsen af fosfor. Der kan være samspil mellem de individuelle elementer (kasser).



3.4.1 Fytase og fytat – betydningen for fordøjeligheden af fosfor

Husdyrene får fosfor fra foderstofferne, men hvis foderets basale indhold af fordøjeligt fosfor er for lille til at dække behovet, suppleres der med mineralsk fosfat, foderfosfater (se 3.4.4). Fosfor optages og indlejres i foderafgrødernes væv, i takt med at planterne vokser. I kerner og frø oplagres fosfor hovedsageligt i form af fytatsalte (inositolfosfat, figur 3.6). Fytatsaltene er vanskelige at nedbryde især for de enmavede dyr, fordi disse dyr kun i begrænset omfang udskiller fordøjelsesenzymer, der bidrager til frigørelsen af fosfatgrupperne fra fytatmolekylerne. Dette er den primære årsag til, at fordøjeligheden af fosfor er lav i fx korn, majs, soja, raps og andre kerner og frø. Fosfor findes også i grønne plantedele, men her er det ikke bundet i fytatsalte men i andre forbindelser (se fx tabel 3.2).

Figur 3.6. Fytatmolekyle (fyttat, *myo*-inositol 1,2,3,4,5,6-hexakisfosfat).



Vejledende værdier for indhold af fosfor i kerner/frø er vist i tabel 3.2 sammen med indholdet af fytatbundet fosfor. Det er vigtigt at bemærke, at foderstoffer af animalsk oprindelse også indeholder fosfor, men at dette fosfor ikke er bundet i fytatsalte. Derfor virker tilsætning af fytase ikke på omsætningen af fosfor i animalske foderstoffer, men kun i foder, som indeholder kerner og frø, fx korn og sojaskrå.

Tabel 3.2. Oversigt over en række fodermidlers fosforindhold, g/kg tørstof og andelen af fytatbundet fosfor i % af det totale indhold af fosfor.

Foderstoffer/grovfoder	Indhold pr. kg tørstof		Fytat-P, % af total P
	g P	g fytat-P	
Byg*	3,5	2,6	75
Hvede*	3,0	2,4	80
Rug*	2,9	2,3	80
Triticale*	3,2	2,7	85
Majs	2,9	2,2	74
Sojaskrå	6,0	2,4	40
Rapskager	12,0	4,4	37
Fiskemel	21,1	0	0
Kløvergræsensilage	3,5	-	-
Bygærthelsædsensilage	3,0	-	-
Majsensilage	2,5	-	-

*Fytaseaktivitet kan påvises i varierende omfang (varmebehandling inaktiverer dog fytase helt eller delvist; se tabel 3.3).

Nedbrydning af fytat øges ved tilstedeværelse af fytaseaktivitet, og enzymet fytase er en væsentlig forudsætning for, at fytat nedbrydes i fordøjelseskanalen. Herved frigøres fosfatmolekylerne og kan absorberes over tarmvæggen. Derfor har tilstedeværelsen af fytase og fytaseaktiviteten meget stor betydning for fordøjeligheden – og dermed udnyttelsen af fosfor – i foder til husdyr (se 3.4.2). Fytase findes naturligt i frø og kerner, men det findes ikke altid i den aktive form, men nogle gange som proenzym, som først skal aktiveres (gælder fx havre og majs; se nedenfor). Den fytase, der findes i korn, kan inaktiveres ved varmebehandling, og når foderet varmebehandles på foderfabrikkerne, vil kornfyttaseaktiviteten falde. Til trods herfor ses der som oftest et fytaseindhold på mindst 200 FTU/kg foder efter varmebehandling (fx Jørgensen et al., 1999). Derimod vil aktiviteten af kornfyttase normalt forblive intakt, hvis færdigfoderet blandes på bedriften (hjemmeblandet foder), hvor kornfyttase ofte bidrager

markant til det samlede indhold af fytase i færdigfoder. Tabel 3.3 viser fosfors fordøjelighed i foderstoffer med forskellig fytaseaktivitet før og efter varmebehandling af korn (81^o C iht. *Salmonella*-handlingsplanen, der blev iværksat omkring 1993 med det formål at reducere forekomsten af *Salmonella*). Der kan altid påvises fytaseaktivitet i dansk dyrkede kornarter på nær havrekerner. I den lagerfaste majskerne kan der heller ikke påvises fytaseaktivitet (se 3.4.2). Aktivitetens størrelse afhænger af art og sort inden for art. Generelt er aktiviteten af fytase størst i rug efterfulgt af triticale, hvede og byg.

Tabel 3.3 viser endvidere, at fordøjeligheden af fosfor i de enkelte foderstoffer påvirkes af mængden af fytaseaktivitet (FTU / kg tørstof), der er til stede, men tabellen viser også, at der ikke er en entydig og lineær sammenhæng mellem fytaseaktivitet og fordøjeligheden af fosfor. Det fremgår også, at varmebehandling (81^o C) af kornet nedsætter fytaseaktiviteten i forskelligt omfang hos kornarterne. Derfor er effekten af varmebehandling på fordøjeligheden af fosfor også forskellig for kornarterne, men varmebehandling nedsætter dog altid fordøjeligheden af fosfor i korn. Fordøjeligheden af fosfor i udvalgte proteinkilder er vist til sammenligning. Det skal nævnes, at niveauerne for fosfors fordøjelighed kan variere mellem partier, men de viste værdier reflekterer typiske niveauer.

Tabel 3.3. Plantefytaseaktivitet og fordøjelighed af fosfor i en række danske foderstoffer fodret til grise (Poulsen, 2005).

Fodermiddel	Ikke-varmebehandlet		Varmebehandlet	
	Fytaseaktivitet, FTU/kg		Fytaseaktivitet, FTU/kg	
	tørstof	%	tørstof	%
Byg	720	48	590	44
Hvede	690	57	95	30
Rug	1940	53	1730	51
Triticale	1620	54	210	36
Sojaskrå	-	-	0	45
Rapskager	-	-	0	39
Fiskemel (LT)	-	-	-	70

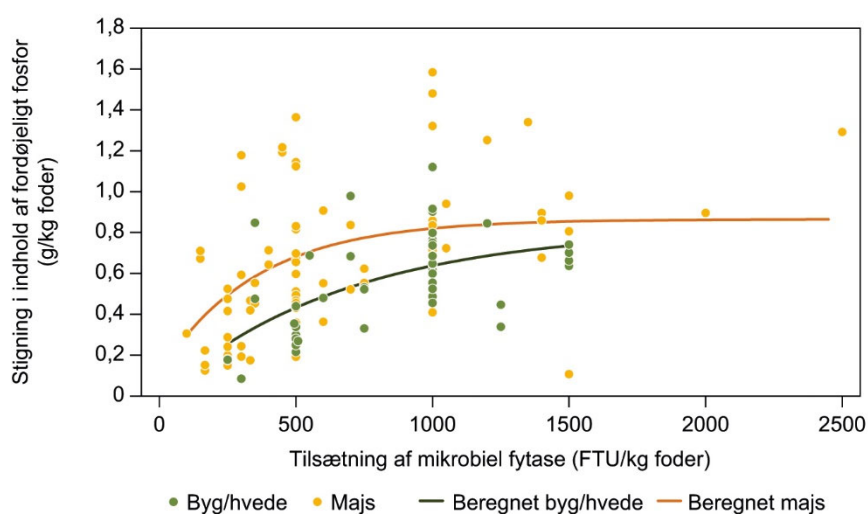
1 FTU svarer til den mængde enzym, der frigør 1 mikromol uorganisk fosfor pr. minut fra 0,00051 mol/l natriumfyat-opløsning ved 37 °C og pH 5,5 (Engelen et al., 1994).

Fytase i foderblandinger kan, som vist i tabel 3.3, stamme fra foderstofferne (mængden afhænger af foderstofkilde og evt. varmebehandling), men i de seneste årtier er det blevet meget udbredt også at tilsætte forskellige typer mikrobielt fremstillet fytase til foderblandinger til enmavede husdyr, da talrige forsøg – nationalt og internationalt – har vist sikker effekt af fytasetilsætning (primært i form af mikrobielt fremstillet fytase) (fx Pedersen & Poulsen 2003; Poulsen et al., 2007; Blaabjerg et al., 2012b). Effektens størrelse kan dog variere meget og afhænger af en række faktorer, fx foderets sammensætning (valg af foderstoffer, indhold af plantefytase, evt. varmebehandling af foderet), udfodring (tør vs. våd), mængden af tilsat fytase mv. De nævnte faktorer har stor betydning for effektiviteten af tilsætning af mikrobiel fytase (Johansen & Poulsen, 2003). Talrige forsøg med tilsætning af mikrobiel fytase til foder til grise har vist varierende effekter på fordøjeligheden af fosfor netop på grund af forskelligheder i de nævnte faktorer, men typisk øges fordøjeligheden op til maksimalt 60-65 % (se 3.4.2).

3.4.2 Anvendelse af mikrobiel fytase i konventionel fodring af enmavede husdyr og drøvtyggere

Tilsætning af mikrobiel fytase stimulerer som nævnt nedbrydningen af fytatmolekylerne (figur 3.6), hvorved fosfationen frigøres og kan absorberes. Derved øges muligheden for, at husdyrene i højere grad kan udnytte det naturligt forekommende fytatbundne fosfor, som findes i de vegetabiliske foderstoffer. Forsøg har afklaret bytteforholdet mellem mikrobiel fytase og fordøjeligt fosfor. Der er desværre ikke lineær sammenhæng mellem fytaseaktivitet (målt i FTU/kg foder) og den mængde fosfor, der frigøres og fordøjes (g fordøjeligt fosfor/kg foder) (Johansen & Poulsen, 2003). Generelt ses der størst effekt ved lavere doseringer, mens effekten klinger af ved højere doseringer. Princippet er vist i figur 3.7, som også viser, at effekten af tilsætning af mikrobiel fytase er størst, når det tilsættes majsbaseret sammenlignet med byg-/hvedebaseret foder. Forskellen i effekt skyldes, at byg og hvede i modsætning til majs indeholder plantefytase, også efter varmebehandling af foderet.

Figur 3.7. Stigning i indhold af fordøjeligt fosfor efter tilsætning af mikrobiel fytase til byg/hvede- og majsbaseret ikke-varmebehandlet foder til grise (Johansen & Poulsen, 2003).



I Danmark er de mest anvendte kornarter byg og hvede, mens kernemajs kun anvendes i mindre grad lige nu. Kurveforløbet for byg/hvede i figur 3.7 (den grønne kurve) er derfor mest relevant til at vurdere effekten af stigende tilsætning af mikrobiel fytase på indholdet af fordøjeligt fosfor, målt som g/kg foder under danske forhold. Figuren viser et generaliseret forløb, idet doseringsforløbet kan afhænge af fytasetype og udfodringsforhold. Tabel 3.4 viser typiske resultater fra et dansk forsøg med tilsætning af fytase til et byg-hvedesojaskrå baseret foder (Blaabjerg et al., 2010b). Det fremgår, at varmebehandlingen inaktiverede fytase, så blanding 2 ikke indeholdt fytaseaktivitet, hvilket resulterede i en 23 % lavere fordøjelighed af fosfor (et fald fra 44 til 34 % i fordøjelighed). Blanding 3 blev tilsat mikrobiel fytase, hvorved fordøjeligheden af fosfor steg med 80 % (fra 34 til 61 %) ved tørfodring. Disse resultater viser det typiske billede af samspillet mellem det naturligt forekomme plantefytase, varmebehandling og mikrobiel fytase ved tørfodring. Effekten af vådfodring beskrives senere (3.5.9).

Der er etableret dyreartsspecifikke formler til beregning af effekten af mikrobiel fytase på indholdet af fordøjeligt fosfor i foder baseret på publicerede forsøgsresultater. Formlerne er udviklet til at omfatte alle gængse typer af mikrobiel fytase og tilpasses løbende, i takt med at der kommer nye produkttyper og –navne på markedet med dokumenteret effekt. Disse formler er inkluderet i de

forskellige foderoptimeringsprogrammer, så rådgivere og producenter kan beregne det forventede indhold af fordøjeligt fosfor, når fodersammensætning og tilsætning af en given mængde mikrobiel fytase fastlægges (fx Tybirk, 2016).

Tabel 3.4. Effekt af varmebehandling af foder samt tilsætning af mikrobiel fytase på fordøjeligheden af fosfor hos grise (Blaabjerg et al., 2010b).

Blanding	1	2	3
Varmebehandling	Nej	Ja	Ja
Tilsat mikrobiel fytase	Nej	Nej	Ja
Udfodring	Tør	Tør	Tør
Resultater:			
Fytaseaktivitet, FTU/kg tørstof	762	ND ¹⁾	1250
Fordøjelighed af fosfor, %	44	34	61

ND: Fytaseaktivitet er ikke målbart dvs. < 50 FTU/kg tørstof

Hos drøvtyggere sker der en omsætning/nedbrydning af fytat i vommen. Selv om forsøg har vist, at tilsætning af mikrobiel fytase også i et vist omfang kan øge nedbrydningen af fytat og dermed tilgængeligheden af fosfor i vommen, er dette ikke dokumenteret i tarmen (Brask-Pedersen et al., 2011; Brask-Pedersen et al., 2013). Derfor er tilsætning af mikrobiel fytase ikke udbredt i foderblandinger til drøvtyggere. Det vurderes til gengæld, at langt de fleste konventionelle foderblandinger til enmavede husdyr i dag tilsættes mikrobiel fytase, da prisen på mikrobiel fytase er meget gunstig. Flere kommercielle typer mikrobiel fytase er godkendt til foder til husdyr, og flere sammenlignende studier af effekten af de forskellige typer/produkter på fordøjeligheden af fosfor er publiceret (fx Poulsen et al., 2010).

Fosfor eller rettere fosfationerne absorberes i den forreste del af tyndtarmen, så den enzymatiske nedbrydning af fytat er under tidspres, da foderets opholdstid i maven og den forreste del af tarmen ofte er ret kort hos grise (Rapp et al., 2001a,b; Blaabjerg et al., 2011). *In vitro*-studier har vist, at nedbrydningen af fytat påvirkes af foderets sammensætning, temperatur, tid, fytaseaktivitet og pH (Carlson & Poulsen, 2003; Blaabjerg et al., 2010a; Blaabjerg et al., 2012a) og partikelstørrelse (Ton Nu et al., 2014). Ofte ses det, at halvdelen af foderet under danske fodringsforhold er passeret ud af maven hos slagtegrise tre timer efter fodring (Blaabjerg et al., 2011). Opholdstiden afhænger bl.a. af foderets sammensætning, fiberindhold, fodringsintervaller og dyrets alder og fysiologiske status. Derfor er den enzymatiske nedbrydning af fytatmolekylet (figur 3.6) stort set aldrig fuldstændig ved fodring med tørt foder, når foderet passerer fosfors absorptionssted i tyndtarmen (Blaabjerg et al., 2010b). Det betyder, at en stor del af det fytatbundne fosfor passerer ufordøjet videre ned i tarmkanalen, og selv om der kan ske yderligere nedbrydning af fytat i bl.a. tyktarmen, vil disse fosfationer ikke blive absorberet og derfor havne i den uudnyttede fosforpulje i fæces.

Formålet med at bruge fytase er, at fytase øger fordøjeligheden af det naturligt forekommende fosfor i foderet, hvorved tilsætning af mineralisk fosfat (foderfosfat) kan helt eller delvist udelades. Optimeret brug af fytase er derfor vejen til at reducere forbruget af foderfosfat (se afsnit 3.4.4), som er det overordnede mål.

3.4.3 Økologisk husdyrproduktion – tilsætning af mikrobiel fytase ikke tilladt

I den økologiske produktion er brug af mikrobielt fremstillet fytase ikke tilladt, hvorfor der er øget fokus på de plantefoderstoffer (kerner og frø), der kan bidrage med plantefytase og dermed øge muligheden for at udnytte foderets eget fosforindhold (Steenfeldt & Poulsen, 2018). Der er derfor brug for en målrettet indsats for at bruge den fytase, der findes i kornet til at forbedre udnyttelsen af fosfor i økologisk produktion (primært enmavede husdyr). Heldigvis nedbryder fytase, som findes i fx hvede, ikke udelukkende fytat i hvede, men også fytat i andre foderstoffer, hvorved den samlede fordøjelighed af fosfor i foderblandingerne øges (Poulsen et al., 2019). Koncentrationen af fosfor i foder til økologisk produktion er ofte højere end i foder til konventionel produktion, fordi fosfors udnyttelsesgrad normalt er lavere i økologisk produktion jf. tabel 3.1. Det skyldes, at nedbrydningen af fytat kun kan stimuleres af foderstoffernes egne enzymer som fx plantefytaser. Dette er en medvirkende årsag til, at udskillelsen af fosfor med gødningen ofte er relativt højere pr. kg produkt i økologisk produktion (tabel 3.1). En anden årsag er, at der i økologisk produktion ikke kan bruges industrielt fremstillede aminosyrer. Derfor skal dyrenes fysiologiske aminosyrebehov udelukkende tilgodeses gennem foderet via proteinfoderstoffer. Da disse proteinkilder ofte også indeholder væsentligt mere fosfor end korn (tabel 3.2), vil økologiske foderblandinger også af denne grund som regel indeholde mere plantefosfor.

3.4.4 Foderfosfater

Tidligere var det meget udbredt at bruge foderfosfat til foder til husdyr for at sikre sig mod problemer med knoglebrud og nedsat produktion. Det var før udviklingen af kommercielt fremstillet mikrobiel fytase, som de seneste 20-25 år i stigende grad er blevet brugt til at øge fordøjeligheden af fosfor i foder til primært enmavede dyr (fx Simons et al., 1990). Der anvendes dog stadigvæk foderfosfat til at forøge foderets indhold af fordøjeligt fosfor, især hvis der bruges foderstoffer med lavt indhold af fordøjeligt fosfor, eller hvis foderforbruget er meget lavt. Fosfors fordøjelighed varierer meget mellem de forskellige typer foderfosfater, men den mest anvendte type i Danmark er MCP (monocalciumfosfat), hvor den sande fordøjelighed målt på slagtegrise er forholdsvis høj, 64-68 % (tabel 3.5). Tabellen viser, at fordøjeligheden af nogle af de øvrige kilder er højere end i MCP, men prisen har indtil nu været ugunstige i det fleste tilfælde.

Kødbenmel var tidligere meget brugt som protein- og mineralkilde, men på grund af udbrud af TSE (transmissible spongiforme encephalopati), herunder BSE (kogalskab), har EU indført restriktioner i brugen af foder af animalsk oprindelse dvs. animalske biprodukter, som ikke er bestemt til konsum (Fødevarestyrelsen, 2018). Det fremgår, at der er mulighed for at fremstille dicalciumfosfat og tricalciumfosfat til enmavede dyr (ikke-drøvtyggere) ud fra nærmere specificerede animalske biprodukter og forarbejdningsled (Fødevarestyrelsen, 2018).

Forbruget af foderfosfat i den danske husdyrproduktion blev i 2005 opgjort til 17.800 ton fosfor, som fordelte sig med 64, 25 og 11 % på grise, kvæg og fjerkræ (Poulsen & Rubæk, 2005). Der bruges ikke foderfosfat i pelsdyrfoder, da de anvendte foderstoffer bidrager med rigeligt fosfor til at dække dyrenes fysiologiske behov.

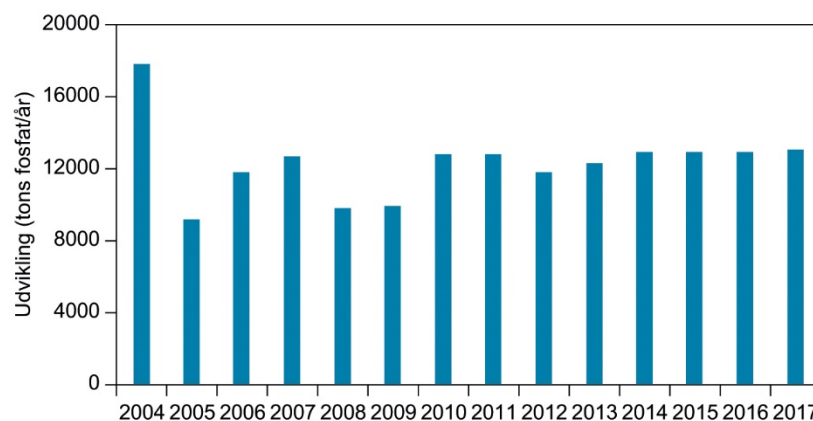
Tabel 3.5. Fordøjelighed af fosfor i forskellige foderfosfater, fosforsyre samt kødbenmel (Poulsen, 1995, 1998, 2007; Poulsen & Tybirk, 2006).

	Fordøjelighed af fosfor, %
Ca-Na fosfat	50
Dicalciumfosfat, DCP	51-59
Monocalciumfosfat, MCP	64-68
Mononatriumfosfat, MSP	79
Mono-dicalciumfosfat, MDP	72
Fosforsyre	75-80
Kødbenmel ¹⁾	54

¹⁾ P.t. er der restriktioner for anvendelsen af foder af animalsk oprindelse som fosforkilde blandt andet på grund af risiko for TSE (transmissible spongiforme encephalopati), herunder BSE (kogalskab).

Forbruget af foderfosfat blev afgiftsbelagt i forbindelse med indførelsen af Vandmiljøplan III i 2005. Målet med afgiften (5 kr. pr. kg; afgiften er netop fjernet i forbindelse med indgåelse af finanslovsaftalen for 2019) var at begrænse importen af foderfosfat mest muligt og at stimulere til at erstatte foderfosfat med tilsætning af mikrobiel fytase. Optimeret brug af fytase er - som nævnt side 59 - vejen til at reducere forbruget af foderfosfat, og der forventes, at der igen vil ses et fald i forbruget af foderfosfat, som forklaret i afsnit 3.4.2 nederst. Figur 3.8 viser udviklingen i forbruget siden 2005. Til sammenligning vises det beregnede forbrug i 2004 (Poulsen & Rubæk, 2005).

Figur 3.8. Udviklingen i forbruget af foderfosfat, ton fosfor/år siden igangsætningen af Vandmiljøplan III i 2005 (afgiften blev indført pr. 1. maj 2005, hvorfor år 2005 kun omfatter 8 måneders forbrug). Forbruget i 2004 er beregnet (Poulsen & Rubæk, 2005).



Figuren viser, at der i årene 2008 og 2009 sås en markant nedgang i forbruget ift. 2004. Derefter steg det årlige forbrug igen og har siden ligget næsten konstant på omkring 13.000 ton/år, hvilket svarer til en reduktion i forbruget på godt 25 % ift. det beregnede forbrug på 17.800 ton/år før indførelsen af afgiften i 2005. Med indførelsen af de nye fosforregler er der aktuelt stort fokus på forholdet mellem kvælstof og fosfor i husdyrgødningen, idet N:P-forholdet generelt er lavere hos enmavede husdyr end hos drøvtyggere (Sørensen et al., 2019). Det har betydning for arealkravene ved udbringning af husdyrgødning, da N/P-forholdet påvirker mængden af fosfor, der 'følger med' ved en gødningsmængde svarende til fx 170 kg kvælstof. Mængden af fosfor, der 'følger med' 170 kg kvælstof, varierer meget og er størst hos enmavede husdyr (Sørensen et al., 2019). Derfor forventes det, at der igen vil ses et fald i forbruget af foderfosfat, som fortsat hovedsageligt bruges i grise- og fjerkræproduktionen. Overordnet forventes det - alt andet lige - at medføre en reduceret udskillelse af fosfor hos grise og fjerkræ, hvilket vil reducere kravet til udbringningsarealer (Sørensen et al., 2019).

3.5 Værktøjer til at forbedre fosforudnyttelsen hos husdyr

Der er flere muligheder for at forbedre husdyrenes udnyttelse af fosfor og dermed reducere udskillelsen pr. individ. Mulighederne er dog ikke ens for alle husdyrarter. Mulighederne belyses i dette afsnit, dels ved nogle generelle muligheder som i varierende omfang gælder alle husdyrarter, dels ved nogle særlige muligheder for visse husdyrarter.

3.5.1 Fysiologisk behov og fodringsanbefalinger (fodringsnormer) – generelt alle husdyr

Fodringsanbefalingerne, som bruges ved formulering af fodersammensætningen for at sikre tilstrækkelig forsyning med næringsstoffer såsom fx fosfor til at undgå mangelsymptomer, omfatter to grundlæggende elementer: (i) *det eksperimentelt bestemte fysiologiske behov* og (ii) en *sikkerhedsmargen*, der lægges oven i det fysiologiske behov. Sikkerhedsmargenen er nødvendig for at tage højde for variation i indhold og fordøjelighed af fosfor, blandeusikkerheder, afblanding ved udfodring og usikkerheder forbundet med overførsel af viden indsamlet under kontrollerede forsøgsforhold til de forhold, der er gældende ved praktisk husdyrproduktion. Tidligere var sikkerhedsmargenen ret stor, fordi usikkerhederne var store. Det, der er sket i de senere år, og som vil fortsætte fremover, er, at forskning og tekniske muligheder forventes at gøre variation og usikkerhed mindre og mindre og derfor gøre det forsvarligt at reducere sikkerhedsmargenen yderligere. Forudsætningen for, at dette sker, er naturligvis, at man i stadigt større omfang kan opnå ny viden omkring håndtering og styring af de nævnte usikkerhedsfaktorer, og at der udvikles præcisionsudstyr til foderoptimering, foderblanding, udfodring mv., så man til stadighed kan være sikker på, at dyrene får deres behov dækket.

Generelt er det sådan, at jo mere der barberes af sikkerhedsmargenen ved fastlæggelsen af fodringsanbefalingerne, desto større er kravet om mere præcis viden om fysiologisk behov og usikkerheder i forbindelse med udmøntning i praksis (fodringen). Derfor vil der fortsat være behov for stor forsknings- og forsøgsaktivitet til at understøtte udviklingen i retning mod en mere effektiv udnyttelse af foderets indhold af fosfor. Den stigende fokusering på fodereffektivitet (højere foderudnyttelse) gennem avl og management stiller ligeledes krav om tilsvarende opdatering af behov og fodringsanbefalinger.

Selv om det eksperimentelle vidensgrundlag omkring dyrenes fosforbehov er forbedret markant gennem de seneste årtier, er der fortsat behov for øget viden om husdyrs fysiologiske fosforbehov under hensyntagen til dyrenes aktuelle produktivitet, foderforbrug og ikke mindst dyrenes fysiologiske status som fx vækstfase, reproduktion, mælke-/ægproduktion, skindsætning mv. Vidensbehovet omkring det fysiologiske behov er ikke lige stort for alle husdyrarter og -kategorier. Generelt er der størst forsøgsmæssig viden om 'de største produktioner' som slagtegrise (fx Sørensen et al., 2018), slagtekyllinger og malkekøer, hvorimod viden om de 'mindre produktioner' i høj grad er baseret på empiriske vurderinger.

3.5.2 Produktivitet og effektiv næringsstofudnyttelse – generelt alle husdyr

Det er velkendt, at når der skal bruges færre kg foder (eller foderenheder) til at producere et kg produkt (mælk, kød), et kg æg eller et pelsdyrskind, vil der – alt andet lige – udskilles mindre fosfor med gødningen (fx Poulsen et al., 2013). Den stigning i produktivitet, der er sket og fortsat sker i de fleste produktioner, skyldes bl.a. fremgang i dyrenes genetiske potentiale både mht. produktion, sundhed og velfærd gennem avlsarbejdet. En stor del af reduktionen i udskillelsen af fosfor med husdyrgødningen skyldes derfor en mere effektiv foderudnyttelse og ikke kun det stigende forbrug af mikrobiel fytase (se figur 3.1, 3.2 og 3.3). Der forventes fortsat forbedring af foderudnyttelsen dvs. forbruget af kg foder / produkt i de kommende år, så alt andet lige må det forventes, at indholdet i gødningen vil falde, selv om det må forventes at blive mere beskedne fald end de fald, der sås for nogle husdyrarter og -kategorier for 10-20 år siden. Afsnit 3.6 beskriver dog, at 'alt andet ikke altid er lige', og at der kan opstå barrierer, der kan forhindre eller begrænse den lige vej.

3.5.3 Foderoptimeringsprogrammer og kemisk analyse for fosfor i foder – generelt alle husdyr

En forudsætning for korrekt dosering med fordøjeligt fosfor tilpasset dyrenes fysiologiske fosforbehov er fagligt opdaterede og korrekte foderoptimeringsprogrammer. Derfor bruges der konstant ressourcer på at opdatere de dyreartsspecifikke systemer med den nyeste viden om fx indhold af fordøjeligt / tilgængeligt fosfor og effekten af tilsætning af mikrobiel fytase. Foderoptimeringssystemer vil således også fremover være en hjørnesten i arbejdet med at minimere fosforudskillelsen.

Der er tilsyneladende fortsat problemer med at analysere for det korrekte indhold af fosfor i foder, foderstoffer mv., selv om det i forbindelse med etableringen af Vandmiljøplan III blev påpeget, at variationen mellem laboratorier af de samme prøver (ringtest i perioden 2003-2006) ofte var stor og i nogle tilfælde helt op omkring 25 % (Hansen-Møller et al., 2007). Dette giver stor usikkerhed omkring troværdigheden af de angivne værdier for fosforindhold og kan give anledning til både over- og underforsyning hos husdyr og tilsvarende udfordringer med korrekt angivelse af fosforindhold i husdyrgødning (gødskningsplaner, biogasanlæg mv.). Denne manglende sikkerhed på resultaterne fra den kemiske analyse kan få afgørende betydning for muligheden for at øge udnyttelsen af fosfor og reducere fosforudskillelsen pr. individ uden at påvirke produktion og velfærd negativt. Manglende analysesikkerhed er derfor en afgørende barriere for at øge effektiviteten via fodringen, og Hansen-Møller et al. (2007) påpegede, at der allerede dengang var et stort behov for øget opmærksomhed omkring procedurerne for den kemiske bestemmelse af fosfor både mht. det anvendte apparatur men også mht. forberedelsen af prøverne. Variationer i fx analyseresultater blev der tidligere taget højde for ved at tillægge en vis sikkerhedsmargen ved optimeringen af foderet, men størrelsen af sikkerhedsmargenen bliver nu tit reduceret mere og mere.

3.5.4 Management, variation i udskillelsen af fosfor og korrektioner af normtal (Type 2) – generelt alle husdyr

Det er gennem god og sikker management på de enkelte bedrifter, at det genetiske potentiale for forbedret fodereffektivitet skal indfries ved inddragelse af ny viden om: (i) fosforbehov, (ii) mulighederne for mere præcis fodring, (iii) brug af fytase og (iv) udfodringssystem. Der er aktuelt stor forskel på fx

husdyrenes foderforbrug mellem de enkelte bedrifter. Det fører til store variationer i, hvor meget fosfor der udskilles med gødningen fra dyr, der opdrættes på de forskellige bedrifter. Forbedringer i management er derfor en væsentlig forudsætning for at øge den samlede udnyttelse af fosfor i husdyrproduktionen. Hvis foderforbruget fx ligger højt ift. andre sammenlignelige produktioner, vil der også alt andet lige kunne hentes en besparelse på foderudgiften udover, at fosforudskillelsen bliver mindre, og N:P-forholdet bliver større (tabel 3.1).

Endvidere må det ikke glemmes, at præcision og sikker management i hele kæden fra foderfremstilling (blandesikkerhed, råvarekendskab mv. på foderfabrikker / hjemmeblandere), udtagning af prøver til analyse (foderstoffer, foderblandinger, forblandinger mv.), foderoptimering, udfodringssystemer (afblanding i foderstrenger, foderspild, hygiejne (især vådfodring) mv.) i samspil med dyrenes genetiske potentiale og respons er påkrævet for at begrænse den store variation, der ses i fosforudskillelsen / fosforudnyttelsen mellem bedrifter.

I tabel 3.1 er vist de beregnede normværdier for udnyttelse og udskillelse af fosfor, men i praksis kan udskillelsen som nævnt variere meget. Beregninger viser, at variationer i fx foderforbrug hos slagtegrise alene kan påvirke udskillelsen med mindst 20 %. Hvis andre parametre som fx foderets fosforindhold også inddrages, vil større variationer på 30-35 % kunne ses. For slagtegrise betyder det, at udskillelsen, der aktuelt ligger på 0,66 kg fosfor (tabel 3.1), kan variere med op til omkring 0,2 kg pr. gris. Samme udsving kan ses hos de fleste andre husdyrarter og -kategorier. Det viser, at fokus på management mv. er en central faktor for at reducere udskillelsen af fosfor.

Det kan nævnes, at der er mulighed for, at den enkelte husdyrproducent kan beregne egne aktuelle værdier for udskillelsen af fosfor ved at bruge Type 2-korrekationer, hvis fx produktivitet, foderets indhold af fosfor mv. afviger fra forudsætningerne i normtallene for husdyrgødning (Poulsen, 2004-2017; Landbrugsstyrelsen, 2017). Formler til beregning af Type 2-korrekationer findes i både Poulsen (2004-2017) og Landbrugsstyrelsen (2017). Ved at bruge korrekationerne vil forbedringer i management mv. blive udmøntet ved beregning af det aktuelle fosforindhold i husdyrgødningen.

3.5.5 Valg af foderstoffer – generelt alle husdyr

Husdyr får tilgodeset behovet for fosfor gennem foderet, og foderet er sammensat af de foderstoffer, som husdyrproducenten har adgang til. Den procentuelle sammensætning fastlægges ved foderoptimeringen. Før kunne husdyrenes fosforbehov ofte ikke tilgodeses af foderstoffernes eget indhold, så mineralsk fosfor blev som allerede nævnt tilsat foderet. For år tilbage var det også foderstoffernes indhold af 'total fosfor', der indgik i foderoptimeringerne, men i dag er det indholdet af 'fordøjeligt fosfor', der er en forudsætning hos de fleste husdyrarter (enmavede). Det betyder, at foderstoffer med høj fordøjelighed af fosfor foretrækkes, når udskillelsen af fosfor skal være så lille som mulig.

Fremover kan det komme på tale at vælge foderstoffer, der ud over en høj fordøjelighed også indeholder mindre fosfor, når producenterne er presset på arealkravene som følge af fosforreguleringen. Det betyder, at det kan komme på tale at fravælge specifikke foderstoffer med højt fosforindhold. Valg og fravalg af foderstoffer kan derfor blive en af barriererne for fortsat reduktion i udskillelsen af fosfor (uddybes i afsnit 3.6).

Fiskemel var tidligere vidt brugt til fodring af fx fravænnede grise og andre spæddyr og er qua sit naturligt høje indhold af fosfor en meget god fosforkilde til disse dyr, selv om valget af fiskemel skete pga. aminosyreindhold og –profil. Aktuelt vurderes brugen af fiskemel generelt at være økonomisk uinteressant i de fleste tilfælde med undtagelse af specialfoder til spæddyr.

I takt med at der udvikles alternative proteinkilder som fx grønt protein (fra planter), vil disse nye kilder indgå i foderoptimeringen med den mængde (fordøjeligt) fosfor, som de måtte indeholde ud over protein, og blive brugt til de relevante husdyrproduktioner. Indholdet af fosfor pr. kg tørstof ligger i græs på niveau med indholdet i korn (tabel 3.2), men i forbindelse med udvindingen af protein fra græs, kløvergræs mv. ser det ud til, at fosfor primært følger juicedelen og i mindre grad pulpfraktionen, hvorfor der sker en opkoncentrering af fosfor i juicen. I forbindelse med den efterfølgende oprensning af juicedelen ser det ikke ud til, at fosfor følger med proteinkoncentratet, men følger den brune fraktion, som i dag ikke tænkes ind som foderstof, men nærmere som gødning i planteproduktionen. Fordøjeligheden af fosfor i proteinkoncentrat- og pulpfraktionen vil få afgørende betydning for anvendelsen af dette foderalternativ som fosforkilde.

3.5.6 'Superdosering' af mikrobiel fytase til grise/fjerkræ

Som det vist i figur 3.7, forventes der generelt en stigende frigivelse af fordøjeligt fosfor / kg foder, når mængden af mikrobiel fytase øges. Hidtil har doseringer på 500-750 FTU / kg været mest brugt, men gennem den senere tid er det blevet mere almindeligt at anvende 'superdosering', hvor der tilsættes større mængder af fytase. Hvor stor den maksimale effekt, der kan opnås ved 'superdosering', afhænger af flere forhold og diskuteres aktivt lige nu (fx Laird, 2016), hvor nogle husdyrproducenter er klemmt på fosfor pga. den nye lovgivning. Det vurderes, at mange husdyrproducenter vil øge tilsætningen af fytase for at opnå selv små stigninger i fosfors fordøjelighed. Det skal dog nævnes, at der kun kan høstes en miljøeffekt af fytasetilsætning, hvis der samtidigt enten (i) kan reduceres i tilsætningen af foderfosfat, eller (ii) at foderets fosforindhold kan reduceres ved at erstatte fosforrige med fosforfattige foderstoffer. Vurderingen er, at der aktuelt bruges større doseringer end for bare få år siden, selv om effektens størrelse måske kun er begrænset.

Brug af mikrobiel fremstillet fytase og dermed 'superdosering' er kun tilladt i konventionel produktion.

3.5.7 Drøvtyggere – særlige forhold

Foderet til drøvtyggere tilsættes som hovedregel ikke foderfosfat, idet foderstoffernes naturlige indhold af fosfor dækker dyrenes behov til vækst, reproduktion og mælkeproduktion i de fleste situationer. Tilsætning af mikrobiel fytase er ikke relevant hos drøvtyggere, da fytatsaltene nedbrydes i maven (3.4.2).

Mange kvægbrugere er / bliver udfordret med den nye fosforlovgivning. Mulighederne for at reducere udskillelsen af fosfor kan fortsat ske gennem effektivitetsstigninger, men da al fosfor kommer med foderstofferne, betyder det, at der ikke kan udfases foderfosfat, som umiddelbart er den nemme løsning. I mange tilfælde dækkes køernes fosforbehov rigeligt gennem foderstofferne, og producenter, der er / bliver klemmt på fosfor i gødningen, vil formentlig blive nødsaget til at fravælge foderstoffer med et højt fosforindhold. Det kan be-

tyde, at fx lokalt produceret raps med et højere fosforindhold end soja og andre foderstoffer må fravælges for at holde fosforindholdet nede (3.6). Det vurderes at blive den største udfordring (barriere) for at reducere fosforudskillelsen for kvægbrugerne.

3.5.8 Pelsdyr – særlige forhold

Foderet til mink og andre pelsdyr består for en meget stor del af animalske foderstoffer, herunder biprodukter fra fiskerisektoren og slagterier. Disse foderstoffer har et indhold af fosfor, som dækker dyrenes behov så rigeligt. Derfor er udnyttelsen af fosfor generelt meget lav hos mink (7 %). Der bruges hverken tilskud af foderfosfat eller mikrobiel fytase, da de animalske foderstoffer ikke indeholder fytat, og da grundindholdet allerede overstiger dyrenes behov.

I praksis betyder det, at der ikke er fodringsmæssige muligheder for at reducere udskillelsen af fosfor med gødningen, da det vil kræve et voldsomt skifte i foderstofvalg og fodring. Derfor skal udfordringen med for meget fosfor i gødningen løses ad andre veje som fx udspretningsarealets størrelse og / eller gylleseparering mv. (se kapitel 2).

3.5.9 Udfodringssystemer

Mulighederne i forbindelse med udfodring omfatter valg mellem tør- og vådfodring, præcisionsfodring i relation til dyrenes produktionspotentiale (vedligeholdelsesbehov i forhold til produktion) mv.

Tidsfaktoren er vigtig, når man vil maksimere effekten af fytasetilsætning. En måde at forøge den tid, fytase har til at katalysere nedbrydningen af fytatsaltene, er ved at blande foderet med væske (støbsætning) og derefter lade foderet inkl. væske stå i kortere eller længere tid, inden det pumpes ud til dyrene (vådfodring). Effekten af støbsætningen på nedbrydningen af fytat afhænger af, hvor lang tid der støbsættes, temperatur og pH i foderet inkl. vand og naturligvis mængden af fytase (plante og tilsat fytase).

Forsøg med fodertanke har i praksis vist, at selv ved meget lav temperatur (ca. 10⁰ C) skete der en nedbrydning af fytat på 20-30 % over 6-8 timer i foder uden tilsat fytase (Rodenberg et al., 2005). Den forøgede frigørelse af fosfat vil helt klart have øget fordøjeligheden af fosfor, selv om denne ikke blev målt i forsøget. Ved højere temperaturer på 20⁰ og 38⁰ C sker nedbrydningen markant hurtigere sammenlignet med 10⁰ C (Carlson & Poulsen, 2003). Ved en støbsætningstemperatur på 10⁰ C og tilstedeværelse af fytase var 15 % af fytatet ikke nedbrudt efter 72 timer, mens det meste fytat var nedbrudt efter 48 timer ved 20⁰ C og efter 24 timer ved 38⁰ C (Carlson & Poulsen, 2003). Støbsætning og / eller vådfodring udgør en form for 'for-fordøjelse' af fosfor ved at starte den enzymatiske omsætning uden for mave-tarmsystemet og vil udgøre et potentiale til at udnytte fosfor i foderstofferne meget bedre. Herved kan tilsætningen af foderfosfat begrænses, da det naturligt forekommende fosfor i foderstofferne kan dække dyrenes behov helt eller delvist.

Sammenlignende studier af foder tilsat mikrobiel fytase udfodret tørt henholdsvis vådt (tabel 3.6) viste, at vådfodring forøgede fordøjeligheden af fosfor med 18 % fra 61 til 72 % sammenlignet med tørfoder (fx Blaabjerg et al., 2010b; Blaabjerg et al., 2015). Effekten af varmebehandling blev beskrevet i afsnit 3.4.2.

Tabel 3.6. Effekt af varmebehandling af foder samt tilsætning af mikrobiel fytase på fordøjeligheden af fosfor hos grise (Blaabjerg et al., 2010b).

Blanding	1	2	3	4
Varmebehandling	Nej	Ja	Ja	Ja
Tilsat mikrobiel fytase	Nej	Nej	Ja	Ja
Udfodring	Tør	Tør	Tør	Våd
Resultater:				
Fytaseaktivitet, FTU/kg tørstof	762	ND ¹⁾	1250	1060
Fordøjelighed af fosfor, %	44	34	61	72

ND: Fytaseaktivitet er ikke målbart dvs. < 50 FTU/kg tørstof

Vådfodring/støbsætning er derfor en måde til at øge udnyttelsen af det fosfor, der er bundet i foderstofferne. Ovennævnte og andre forsøg har vist, at fordøjeligheden af fosfor kan øges til knap 75 % gennem vådfodring. Når fordøjeligheden af fosfor er så høj, at $\frac{3}{4}$ af fosforet i en foderblanding bliver absorberet, vil foderstoffernes egne fosforindhold kunne dække grisenes behov for fosfor, således at al mineralsk fosfat (foderfosfat) kan udelades. Tilsvarende resultater er set hos fjerkræ (Engberg et al., 2009).

3.6 Muligheder og barrierer for fortsat forbedring af udnyttelsen af fosfor

Foderet sammensættes på grundlag af de typer foderstoffer, der er til rådighed. I mange tilfælde udgør de hjemmedyrkede foderstoffer grundstammen, som suppleres med indkøbte foderstoffer. Andre husdyrproducenter køber færdigfoder produceret af foderstoffirmaer. Næringsstofindholdet optimeres under hensyntagen til pris, indhold og fordøjelighed. Importen af protein i form af soja til husdyrfoder er generelt meget stor og angives at være omkring 1,5 millioner ton årligt (Hermansen et al., 2013; Bosselmann & Gylling, 2014), men i de senere år er brugen af rapsprodukter steget, i takt med at dyrkningen af raps er steget markant i Danmark. Når sojaskrå udskiftes med raps- og/eller solsikkekager, vil færdigfoderets indhold af fosfor stige, da raps fx indeholder omkring dobbelt så meget fosfor som sojaskrå (tabel 3.2). Dette kan resultere i en større udledning af fosfor med husdyrenes gødning.

Da der generelt er et politisk ønske om en mere regional/lokal produktion af proteinafgrøder, er det paradoksalt, at netop de lokalt producerede proteinafgrøder forøger foderets fosforindhold og øger fosforindholdet i husdyrgødning, således at det kan blive besværligt / umuligt for husdyrbedrifter at leve op til nye fosforlofter for, hvor meget fosfor der må tilføres landbrugsjorden. Det er derfor vigtigt, at der fremover er fokus på bæredygtige helhedsløsninger. Det kan nævnes, at tilsvarende problematikker også ses omkring anvendelsen af proteinkoncentrater udvundet af græs, kløvergræs mv. (afsnit 3.5.5).

En stigende del af det fosfor, der findes i foderblandingerne til husdyr (ikke mink), kommer fra korn. Fordøjeligheden af fosfor i korn kan forbedres gennem fx støbsætning og/eller vådfodring. Dette vil kunne bidrage til at udfase en større andel af foderfosfat hos husdyr, hvor der fortsat bruges foderfosfat, primært grise og fjerkræ. Dette vil kræve en særlig forskningsmæssig indsats, som skal fokusere på, hvordan det fytatbundne fosfor i korn kan gøres mere tilgængeligt gennem fx støbsætning / befugtning af kornet før udfodring eller i forbindelse med udfodring. Den tid fytase har 'til rådighed' i mave-tarmkanalen er desværre for kort til at kunne frispalte fosfat fra fytatmolekylet, især

ved tørfodring (3.4.1 og 3.4.2). Samme problem ses ikke ved sojaskrå og i mindre grad ved raps og solsikke.

Samfundet efterspørger i stigende grad kredsløbsløsninger, cirkulær bioøkonomi, hvor restprodukter ('affaldsprodukter') fra industri, energisektoren mv. samt forarbejdet madspild genanvendes fx som foder til husdyr. Sådanne løsninger forudsætter, at kvalitet (indhold af fx fosfor og aminosyrer) og hygiejne er i orden, og at produkterne er økonomisk attraktive. Et eksempel er gærfløde fra fermenteringsindustrien, som traditionelt har været anvendt i større eller mindre grad til foder, ligesom valle fra fremstillingen af ost også blev brugt til dyrefoder.

For at sikre fortsat stigende udnyttelse af fosfor og dermed reduceret udskillelse med gødningen i den animalske produktion vil der fremover formentlig blive sat stigende fokus på dyrkning af foderafgrøder med et lav indhold af fosfor, som til gengæld er meget tilgængelig.

Den største barriere for at forbedre fosforudnyttelsen gennem fodringen i den økologiske produktion er, at der ikke må anvendes tilsætning af mikrobielt fremstillet fytase. Foderafgrødernes eget fytase må gerne anvendes, men der er stor mangel på viden om, hvordan brugen af det naturligt forekommende fytase kan optimeres (Steenfeldt & Poulsen, 2018).

3.7 Husdyrenes udnyttelse af fosfor – status ift. sammenlignelige udenlandske produktioner

I Danmark opgøres husdyrenes udnyttelse af næringsstoffer hvert år i forbindelse med, at normtallene for husdyrgødningens indhold af kvælstof, fosfor og kalium opgøres (tabel 3.1). Normtal og udnyttelse angives pr. produceret enhed (Poulsen, 2004-2017), men tilsvarende data findes ikke umiddelbart for andre lande (Kristensen et al., 2016). For knap tyve år siden blev der gennemført et sammenlignende studie af udskillelsen af fosfor fra grise i Holland, Frankrig og Danmark baseret på samme opgørelsesmetode, som bruges Danmark (Poulsen et al., 1999). Resultatet fra Holland og Danmark er vist i tabel 3.7 sammen med de tilsvarende værdier for 2017 (van Bruggen, personlig meddelelse, Poulsen, 2004-2017). Det skal dog nævnes, at opgørelsesmetoden for 2017 ikke er ens i de to lande, så 2017-tallene er ikke direkte sammenlignelige. Værdier for fransk griseproduktion i 1999 ligger mellem de hollandske og danske værdier.

Tabel 3.7 viser, at fosforindtag, -udskillelse og -udnyttelse adskiller sig markant mellem dansk og hollandsk griseproduktion i 1999. Årsagen hertil ligger i, at Holland havde stort fokus på at reducere fosforudskillelsen op gennem 90'erne, hvor der i Danmark var fokus på udskillelsen af kvælstof. De beregnede relative værdier viser, at griseproduktionen i Danmark og Holland er nogenlunde sammenlignelig med hensyn til udnyttelse og udskillelse af fosfor.

Baseret på informationer fra Holland er fosforbalancen for malkekøer, æglægere og slagtekyllinger beregnet (van Bruggen, 2017) og angivet i tabel 3.8 sammen med de tilsvarende værdier fra Danmark (fra tabel 3.1). Det skal bemærkes, at mælkeydelsen er markant lavere for den hollandske malkeko sammenlignet med den danske malkeko (tung race), og det medfører i sig selv et højere fosforindtag med foderet hos danske køer af tung race. Det er usikkert, om de hollandske tal er gennemsnitsværdier for alle malkekøer (dvs. et gennemsnitstal for tung race, Jersey etc.) i Holland, men den meget (og urealistisk) lave mælke-

ydelse kunne tyde på det. Ses der på de relative værdier, er tallene derimod meget ens. Tilsvarende data- og beregningsusikkerheder gør sig gældende for de øvrige husdyr, og vurderingen er, at de hollandske værdier repræsenterer den samlede population, mens de danske normalt ikke er gennemsnitstal på tværs af produktioner, men er specifikke for hver enkelt underkategori (Poulsen, 2004-2017). Tabel 3.8 viser også de hollandske og danske værdier for æglæggende høner, hvor den beregnede udskillelse af fosfor er noget højere i Holland.

Tabel 3.7. Den beregnede fosforindtag, -aflejring, -udnyttelse og -udskillelse fra grise i Holland og Danmark i 1999 og 2017 (Poulsen et al., 1999; Poulsen, 2017; van Bruggen, personlig meddelelse). Absolutte og relative værdier.

	Holland 1999		Holland 2017		Danmark 1999		Danmark 2017	
	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut ²⁾	Relativ ²⁾
1 årsso:								
Foder P	5,39	100	50,3 ¹⁾	100 ¹⁾	8,03	100	6,88	100
Aflejret	1,35	25	20,1 ¹⁾	40 ¹⁾	1,11	14	1,86	27
Udskilt P	4,04	75	30,2 ¹⁾	60 ¹⁾	6,92	86	5,02	73
1 smågris:								
Foder P	0,157	100	-	-	0,310	100	0,24	100
Aflejret	0,097	62	-	-	0,120	39	0,12	49
Udskilt P	0,060	38	-	-	0,190	61	0,12	51
1 slagtegris								
Foder P	1,16	100	3,5 ³⁾	100 ³⁾	1,11	100	1,07	100
Aflejret	0,43	37	1,6 ³⁾	45 ³⁾	0,39	35	0,44	41
Udskilt P	0,73	63	1,8 ³⁾	55 ³⁾	0,72	65	0,63	59

¹⁾Årsso inkl. smågrise (vurderet til 30 smågrise); ²⁾ Værdier fra tabel 3.1.; ³⁾ Slagtevægt og vægtinterval er meget forskellig fra danske forhold og er ikke sammenlignelige. De tilsvarende relative tal er nogenlunde sammenlignelige mellem dansk og hollandsk produktion

Tabel 3.8. Beregnede værdier for fosforindtag, -aflejring, -udnyttelse og -udskillelse fra malkekøer og æglæggende høner i Holland og Danmark i 2017 (van Bruggen, personlig meddelelse; Poulsen, 2004-2017). Absolutte og relative værdier.

	Holland		Danmark ¹⁾	
	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
1 årsko				
Foder P	27,4	100	31,7	100
Aflejret	9,3	34	10,5	33
Udskilt P	18,1	66	21,2	67
1 årshøne				
Foder P	0,214	100	0,218	100
Aflejret	0,032	15	0,043	20
Udskilt P	0,180	84	0,175	80

¹⁾ Værdier fra tabel 3.1. 1 årsko (tung race)

Den samlede vurdering er, at der til trods for forskelle i fodring mv. og i beregningsmetode alligevel er rimelig overensstemmelse mellem de hollandske og danske niveauer, når der ses på de relative værdier. Dog vurderes de hollandske absolutte værdier for malkekøer at være for lave. Begge lande er kendetegnet ved en stor husdyrproduktion, som er samlet i husdyrtætte egne. Dette har medført, at begge landes husdyrproduktion i høj grad har haft fokus på samspillet mellem miljø og husdyrproduktion igennem mange år.

3.8 Overordnet vurdering af muligheder for at reducere udskillelsen af fosfor fra de forskellige husdyrarter

Først og fremmest skal det fremhæves, at behovet for at reducere fosforindholdet i husdyrgødning ikke er ens for alle husdyrproduktioner, og behovet (kravet) afhænger også af, hvor bedriften er placeret geografisk. Alle områder med husdyrproduktion er nemlig ikke lige udfordret med hensyn til fosfor, ligesom behovet afhænger af, hvad husdyrgødningen skal bruges til (gødskning, biogas mv.).

Mulighederne for at reducere fosforudskillelsen er ikke ens for de forskellige husdyrarter, idet det i princippet burde være 'nemmest' for de produktioner, der fortsat bruger tilskud af foderfosfat og har mulighed for at reducere tilskuddet, dvs. primært grise- og fjerkræproduktionen.

- Foderfosfat kan fortsat udfases hos enmavede dyr (fjerkræ og grise) gennem brug af mikrobiel fytase og /eller foderstoffer med passende indhold af fosfor.
- Valg af foderfosfater med høj fordøjelighed, hvis der skal bruges et tilskud, især til fjerkræ og grise.
- Optimering af brugen af mikrobiel fytase til fjerkræ og grise (aktuelt ikke relevant til drøvtyggere).
- Udfodringsystem: Tiden er en flaskehals for at opnå størst effekt af fytase. Vådfodring øger den tid, der er til rådighed for fytase til at nedbryde fytatsaltene sammenholdt med tørfodring.
- Maksimal nedbrydning af fytat – optimeret brug og dosering af fytase (plante og /eller mikrobiel) tilpasset økologisk henholdsvis konventionel produktion (fjerkræ og grise). Tid er en flaskehals.
- Fasefodring – tilpasning af foderets indhold af fordøjeligt fosfor til dyrenes aktuelle fysiologiske behov (alle dyrearter).
- Skisma mellem regionalt/lokalt producerede afgrøder med relativt højt fosforindhold og importerede foderstoffer med lavere indhold af fosfor, fx sojaskrå vs. rapskager.
- Fortsat fodringsmæssige muligheder for reduceret udskillelse af fosfor i fjerkræ- og griseproduktionen.
- Begrænsede /ingen fodringsmæssige muligheder hos pelsdyr.
- Drøvtyggere – bruger stor set ikke foderfosfat, men store udfordringer ift. højt fosforindhold i foderstofferne. Særlige dyrkningsmæssige udfordringer ved majs til ensilage pga. startgødskning (Mikkelsen, 2018).
- Særlige udfordringer (barrierer) mht. kemisk bestemmelse af fosfor i foder mv., idet variationen i de opnåede resultater fortsat kan variere meget mellem laboratorier.
- Krav om fokus på sikker viden og management i alle led i produktionskæden fra afgrøder og foderstoffer til fodring / pasning af husdyrene.

3.9 Konklusion og perspektiver

Mulighederne for forbedring af fosforudnyttelsen samler sig om to hovedelementer: forbedret fodring og avlsfremgang, som vist i figur 3.5. Hver af de to hovedelementer er underopdelt, ligesom hoved- og underelementer interagerer med hinanden.

De seneste par årtier er udnyttelsen af det foderstofbårne fosfor steget ganske betydeligt bl.a. på grund af, at brugen af foderfosfat er faldet markant med omkring 25 %. Der kan ikke forventes en tilsvarende stor stigning i udnyttelsen af foderets fosfor fremover, selv om der fortsat kan forventes forbedringer

i udnyttelsen gennem produktivitetsfremgang og gennem mere korrekt fodring via bl.a. fasefodring tilpasset den aktuelle viden om dyrenes fysiologi. Dertil kommer øget viden om forbedring af fosfors fordøjelighed gennem brug af fytase (plante og/eller mikrobiel) og udfordringsteknologi (våd vs. tør) til fremme af nedbrydningen af fytat mv. Specielt bør der forskningsmæssigt fokuseres på at øge grise og fjerkræ's udnyttelse af fosfor i korn gennem fx støbsætning eller befugtning før udfodring og/eller støbsætning/vådfodring i forbindelse med fodringen. Kornet bidrager nemlig ofte med en meget stor andel af fosforet i foderblandingerne.

Forbedringen kræver fortsat basal forskning og forsøg kombineret med rådgivning og implementering af de opnåede resultater i praktiske redskaber som foderoptimeringsprogrammer, managementsystemer, foderstofvalg etc.

Perspektiverne for optimering af fodringen af husdyr er 'at opnå en højere udnyttelse af fosfor hos husdyr og dermed bidrage til en forbedret og bæredygtig fosforøkonomi i hele kæden', dvs. få tilbageholdt (aflejret) relativt mere af den tilførte fosfor i de animalske produkter og udskilt mindre fosfor i gødningen. Mulige fodringsmæssige tiltag er ikke alle lige økonomisk attraktive, ligesom det ikke er muligt at tage alle de skitserede tiltag i brug straks. De fleste tiltag har en lidt længere tidshorisont og kan inddrages, i takt med at der løbende fremkommer nye forskningsresultater.

Nærværende kapitel angiver muligheder for at rette fokus mod fodringsmæssige tiltag, som afhænger af, hvor presset den enkelte husdyrproducent er, og således også af husdyrart og -kategori, de geografiske udfordringer, afsætningsmuligheder for husdyrgødning etc. Målet er at bidrage til sikring af bæredygtighed i alle tre elementer: miljø, økonomi og samfundskrav/-hensyn. Sammen drag over potentialer og barrierer for fodringsmæssige tiltag for de enkelte produktionsgrene er vist i tabel 3.9.

Tabel 3.9. Sammendrag over potentialer og barrierer for fodringsmæssige tiltag for de enkelte produktionsgrene. Bag de tre nævnte indsatser (fosforbehov, fytase og management) ligger avlsmæssig fremgang og direkte og afledte fodringsmæssige tiltag og justeringer.

	Metode	Effekt	Dyrearter	Potentiale	Kommentar	Generelt eller regionalt ¹⁾	Barrierer
1 Fosforbehov:							
Fasefodring	Fodre efter fosforbehov i hele produktionsperioden.	Løbende reduktion i udskillelsen pga. ny viden.	Alle; mink mindre pga. overforsyning (stor).	Afhænger af dyreart og -kategori.	Kræver deltageret viden om fysiologisk behov.	Generelt; løbende forbedringer.	Sikkerhedsmargin reduceres. Risiko for fejlblandinger bliver større. Analyseusikkerhed (fosfor).
Foderoptimering	Tilpasse foderets sammensætning og indhold til behov.	Løbende reduktion i udskillelsen i takt med forbedrede systemer.	Alle, dog ikke mink pga. for stort indhold i foderstoffer.	Løbende effekt, som høstes i takt med ny viden.	Forbedres i takt med ny viden for kvæg, grise og fjerkræ.	Generel effekt.	Paradokser ift. krav om lokalt produceret protein, som ofte er rig på fosfor. Analyseusikkerhed (fosfor).
Foderfosfater	Reducere forbruget; vælge typer med høj fordøjelighed.	Forbruget kan reduceres/fjernes, i takt med at fordøjeligheden af plante-fosfor øges. Samspil med især fytase.	Grise og fjerkræ. Foderfosfat bruges ikke hos mink og meget begrænset hos drøvtyggere.	Størst hos grise og fjerkræ. Meget begrænset hos drøvtyggere.	Forudsætter høj fordøjelighed af fosfor i plantefoderstofferne. Erstatte af fytasetilskud. Tidligere afgiftsbelagt (afskaffet med finansloven for 2019)	Generel effekt, men udfasning kan også medføre en målsætning regionalt /lokalt.	Begrænset ressource (kvalitet) på sigt. Kvalitet/renhed? Begrænsninger i brugen af foder af animalsk oprindelse og 'animalske biprodukter' – øget recirkulering?
2 Fytase:							
Plante	Bruge kerner og frø egne fytaser mere aktivt	Erstatte foderfosfat og fosforrige foderstoffer. Både økologisk og konventionel produktion.	Grise og fjerkræ.	Stort, især ved vådfodring/støbsætning. Eneste mulighed for at bruge fytase i økologisk produktion	Særligt potentiale for økologisk produktion, som ikke må bruge tilsætning af mikrobiel fytase og frie aminosyrer (medfører et højt råproteinindhold i økofoder).	Generel og regionalt. Især økologisk produktion. Konventionel produktion kan bruge tilsætning af mikrobiel fytase.	Konflikter med varmebehandling af foderet (korn) af hensyn til forebyggelse af <i>Salmonella</i> .
Mikrobiel (tilsat)	Øge brugen af mikrobiel fytase, som dog er vidt udbredt til grise og fjerkræ	Erstatte foderfosfat og fosforrige foderstoffer. Kun konventionel produktion.	Grise og fjerkræ.	Stort ved både tør- og vådfodring.	Fremtidig effekt afhænger af, om hvor meget fytase, der bruges aktuelt.	Generel effekt.	Mikrobiel fytase er konkurrencedygtig.
Dosering	Højere dosering med mikrobiel fytase	Erstatte foderfosfat og fosforrige foderstoffer.	Grise og fjerkræ.	Mindre; afhænger af dosering og fodersammensætning	Aftagende effekt med stigende dosis. Kan bruges som en form for sikkerhedsdosering.	Særligt bedrifter, der er udfordret på fosfor.	Oftest konkurrencedygtig.

3 Management:

Tørfodring	Foderet udfodres tørt. Kombineres med præcisionsfodring.	Nedsat udskillelse af fosfor.	Alle dyrearter	Kombineres med fytase hos fjerkræ og grise.	Tørfodring er velkendt.	Generelt	Udfodringen skal være mere præcis; mindre foderspil mv.
Vådfodring	Foderet blandes med vand mv. inden udfodring. Kombineres med præcisionsfodring.	Øget fordøjelighed af fosfor; 'for-fordøjelse'.	Grise og fjerkræ	Stor; øget tid til nedbrydning af fytat vha. fytase.	Vådfodring kan optimeres, specielt rettet mod fytatbundet fosfor i korn. Krav til bedre hygiejne.	Generelt, men også særligt bedrifter, der er udfordret på fosfor.	Særlige udfordringer ift. de industrielt fremstillede aminosyrer (konventionelle brug).
Præcisionsfodring	Mere effektiv fodring; øget fodereffektivitet mv.	Minimere fosforudskillelsen; p.t. stor variation mellem bedrifter.	Alle husdyrarter	Stort set alle husdyrarter.	Kræver fokus på management og udstyr i hele produktionskæden.	Generelt – meget relevant for bedrifter, der er udfordret på fosfor.	Kræver uddannelse, vidensoverførsel, økonomi til udstyr (afhænger af bedrift).

¹⁾ Skal for de enkelte bedrifter ses/vurderes ift. de indførte fosforlofter og de kommende stramninger.

4. Referencer

Andersen, H.E., Baatrup-Pedersen, A., Blicher-Mathiesen, G., Christensen, J.P., Heckrath, G., Nordemann Jensen, P. (red.), Vinther, F.P., Rolighed, J., Rubæk, G. & Søndergaard, M. 2016. Redegørelse for udvikling i landbrugets fosforforbrug, tab og påvirkning af Vandmiljøet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 86 s. - Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 77 <http://dce2.au.dk/pub/TR77.pdf>

Bekendtgørelse nr. 1020 af 06/07/2018 om godkendelse og tilladelse m.v. af husdyrbrug (husdyrbrugsloven)

Bekendtgørelse nr. 996 af 25/06/2018 om jordbrugets anvendelse af gødning og om plantedække (gødskningsloven)

Bekendtgørelse nr. 1650 af 13/12/2006 om anvendelse af affald til jordbrugsformål (Slam-bekendtgørelsen)

Bekendtgørelse nr. 818 af 21/07/2008 om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål. <https://www.retsinformation.dk>

Bekendtgørelse nr. 1076 af 28/08/2018 om erhvervsmæssigt dyrehold, husdyrgødning, ensilage mv.
<https://www.retsinformation.dk/pdfPrint.aspx?id=202840>

Blaabjerg, K., Carlsson, N.-G., Hansen-Møller, J. & Poulsen, H.D. 2010a. Effect of heat-treatment, phytase, xylanase and soaking time on inositol phosphate degradation *in vitro* in wheat, soybean meal and rapeseed cake. *Animal Feed Science and Technology* 162, 123-134.

Blaabjerg, K., Jørgensen, H., Tauson, A.-H. & Poulsen, H.D. 2010b. Heat-treatment, phytase and fermented liquid feeding affect the presence of inositol phosphates in ileal digesta and phosphorus digestibility in pigs fed a wheat and barley diet. *Animal* 4, 876-885.

Blaabjerg, K., Jørgensen, H. & Poulsen, H.D. 2011. The presence of inositol phosphates in gastric pig digesta is affected by time after feeding a non-fermented or fermented liquid wheat- and barley-based diet. *Journal of Animal Science* 89, 3153-3162.

Blaabjerg, K., Strathe, A.B. & Poulsen, H.D. 2012a. Modelling phytate degradation kinetics in soaked wheat and barley. *Animal Feed Science and Technology* 175, 48-56.

Blaabjerg, K., Nørgaard, J.V. & Poulsen, H.D. 2012b. Effect of microbial phytase on phosphorus digestibility in non-heat-treated and heat-treated wheat-barley pig diets. *Journal of Animal Science* 90, 206-208.

Blaabjerg, K., Thomassen, A.-M. & Poulsen, H.D. 2015. Microbial phytase addition resulted in greater increase in phosphorus digestibility in dry-fed compared with liquid-fed non-heat-treated wheat-barley-maize diets for pigs. *Animal* 9, 243-248.

- Blicher-Mathiesen, G., Rasmussen, A., Rolighed J., Hans Estrup Andersen, H.A., Carstensen, V.D., Jensen, P.G., Wienke J., Hansen, B. & Thorling, L. 2016. Landovervågningsoplande 2015. DCE Rapport Nr. 205. Silkeborg. <http://dce2.au.dk/pub/SR205.pdf>.
- Bosselmann, A.S. & Gylling, M. 2014. Miljømæssige konsekvenser ved den danske import majs og soja til svinefoderproduktionen. Notat. Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet, 11 sider.
- Brask-Pedersen, D.N., Glitsø, L.V., Skov, L.K., Lund, P. & Sehested, J. 2011. Effect of exogenous phytase on feed inositol phosphate hydrolysis in an *in vitro* rumen fluid buffer system. *Journal of Dairy Science* 94, 951-959.
- Brask-Pedersen, D.N., Glitsø, L.V., Skov, L.K., Lund, P. & Sehested, J. 2013. Effect of exogenous phytase on degradation of inositol phosphate in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 96, 1691-1700.
- Burton, C.H. & Turner, C. 2003. *Manure Management: Treatment Strategies for Sustainable Agriculture*, 2nd ed., Silsoe Research Institute, UK.
- Carlson, D. & Poulsen, H.D. 2003. Phytate degradation in soaked and fermented liquid feed – effect of diet, time of soaking, heat treatment, phytase activity, pH and temperature. *Animal Feed Science and Technology* 103, 141-154.
- Cordell, D., Drangert, J.O. & White, S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19 (2): 292–305. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
- Cordell, D., & Neset, T.S.S. 2014. Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of National and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity. *Global Environmental Change* 24, 108-122. doi:10.1016/j.gloenvcha.2013.11.005.
- Delin, S. 2015. Fertilizer value of phosphorus in different residues. *Soil Use and Management* 32(1), 17-26. doi.org/10.1111/sum.12227
- Egle, L., Rechberger, L. & Zessner, M. 2014. Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser. Vienna. http://iwr.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-wasserguete/Projekte/Phosphor/Phosphorrückgewinnung_aus_dem_Abwasser_Endbericht_6.3.14.pdf
- Egle, L., Rechberger, H. & Zessner, M. 2015. Comparison of methods for recovering phosphorus from wastewater and sewage sludge. *Resources, Conservation & Recycling*. doi:10.1016/j.resconrec.2015.09.016
- Elser, J. & Bennett, E. 2011. A broken biogeochemical cycle. *Nature* 478: 29-31.
- Engberg, R.G., Hammershøj, M., Johansen, N.F., Abousekken, M.S., Steinfeldt, S. & Jensen, B.B. 2009. Fermented feed for laying hens: Effects on egg production, egg quality, plumage condition and composition and activity of the intestinal microflora. *British Poultry Science* 2, 228-239.

Engelen, A.J., Vanderheeft, F.C., Randsdorp, P.H. & Smit, E.L.C. 1994. Simple and rapid-determination of phytase activity. Journal of AOAC International 77, 760-764.

European Commission. 2017. Study on the Review of the List of Critical Raw Materials. Non-Critical Raw Materials Factsheets. doi:10.2873/49178.

Frandsen, T. 2018. Personlig kommunikation.

Fødevarestyrelsen, 2018. Generelt om foder af animalsk oprindelse. <https://www.foedevarestyrelsen.dk/Leksikon/Sider/Generelt-om-animalsk-foder.aspx>. Tilgået 1. november 2018.

Graaff, L.D., Odegard, I. & Nusselder, S. 2017. LCA of thermal conversion of poultry litter at BMC Moerdijk. CE Delft report. https://www.ce.nl/publicatie/lca_of_thermal_conversion_of_poultry_litter_at_bmc_moerdijk/1986

Gylling, M., Lillethorup, T.R. & Jensen, M.V. 2016. Organisk affald - Fra husholdninger og servicesektoren samt effekter af nuværende anvendelse. Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi (IFRO) Københavns Universitet http://naturerhverv.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Tvaergaaende/Biooekonomi/Notat_fra_IFRO_om_Organisk_affald.pdf

Hansen-Møller, J., Tybirk, P. & Poulsen, H.D. 2007. Kemisk bestemmelse af fosfor i foder varierer meget mellem danske laboratorier. DJF Husdyrbrug nr. 83, 54 sider.

Hermansen, J.E., Knudsen, M.T. & Sørensen, J. 2013. Soja og palmeolie. Certificeringsordninger til dokumentation af bæredygtighed i forbindelse med produktion. DCA Rapport nr. 20, 43 sider.

Hjorth, M., Christensen, K.V. Christensen, M.L. & Sommer, S.G. 2007. Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. I: Agronomy for Sustainable Development, Bind 30, Nr. 1, 2009, s. 153 – 180

Jacobsen, B.H. 2017. Analyse af omkostningseffektiviteten ved anvendelse af miljøteknologi til recirkulation af fosfor fra husdyrgødning på baggrund af erfaringer fra Nederlandene, 37 s., IFRO Udredning, Nr. 2017/29

Jensen, M.D., Tychsen, P., Thomsen, M., Martinsen, L. & Berit Hasler 2015. Bæredygtig Udnyttelse Af Fosfor Fra Spildevand. Miljøprojekt Nr. 1661. Copenhagen: Miljøstyrelsen. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/03/978-87-93283-94-7.pdf>.

Johansen, K. & Poulsen, H.D. 2003. Substitution of inorganic phosphorus in pig diets by microbial phytase supplementation – a review. Pig News and Information 24, 77N-82N.

Jørgensen, L., Dahl, J., Jensen, B.B. & Poulsen, H.D. 1999. Effekt af ekspandering, pelletering og formalingsgrad på *Salmonella*, produktionsresultater og mave-tarmsundhed hos slagtesvin samt på fytaseaktivitet og vitaminstabilitet i foder. SEGES Svineproduktion. Meddelelse 426, 27 sider.

Klinglmair, M., Lemming, C., Jensen, L.S., Rechberger, H., Astrup, T.F. & Scheutz, C. 2015. Phosphorus in Denmark: National and regional anthropogenic flows. Resources, conservation and recycling 105, B, 311-324. doi:10.1016/j.resconrec.2015.09.019.

Kristensen, I.S., Hermansen, J.E., Kristensen, T. & Poulsen, H.D. 2016. Udskillelsen af næringsstoffer (N & P) i husdyrgødningen ved produktion af mælk, oksekød, svinekød og fjerkræ samt markoverskud ved dyrkning af hvede i Danmark, Sverige, Tyskland, Holland og Polen. DCA Notat, 9 sider.

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, 293-303.

Laird, S. 2016. The effects of super-dosing phytase in the growing pig. The University of Leeds, School of Biology, Faculty of Biological Sciences, UK, PhD thesis, 231 sider.

Landbrugsstyrelsen. 2017. Vejledning om gødsknings- og harmoniregler. Planperioden 1. august 2017 til 31. juli 2018. 180 sider.

Lederer, J., Laner, D. & Fellner, J. 2014. A framework for the evaluation of anthropogenic resources : The case study of phosphorus stocks in Austria." Journal of Cleaner Production 84, 368-381. doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.078.

Lunde, A. 2018. Personlig kommunikation.

Martinez, J., Burton, C.H., Sneath, R.W. & Farrent, J.W. 1995. 'A study of the potential contribution of sedimentation to aerobic treatment processes for pig slurry. Journal of Agricultural Engineering Research 61, 87-96.

Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R. & Gyldenkerne, S. 2016. Biogasproduktions konsekvenser for drivhusgasudledning i landbruget. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 197

Mikkelsen, M. 2018. Loft på fosfor – hvad kan betale sig? Kvæg Nyt 7. SEGES.

Miljøstyrelsen. 2013. Oparbejdning Af Organisk Affald Til Biopulp. Miljøprojekt Nr. 1506. Copenhagen.
<https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2013/10/978-87-93026-53-7.pdf>.

Miljøstyrelsen. 2014. Danmark Uden Affald. Ressourceplan for Affaldshåndtering 2013-2018. Vejledning Fra Miljøstyrelsen Nr. 4, 2014. Copenhagen. <http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2014/05/978-87-93178-55-7.pdf>.

Miljøstyrelsen. 2015. Udvinning af fosfor fra slammaske med elektrokemisk teknik Miljøprojekt nr. 1702, 2015. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/04/978-87-93352-10-0.pdf>

Miljøstyrelsen. 2017. Affaldsstatistik 2015. Copenhagen: Miljøstyrelsen.
<http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2017/05/978-87-93614-01-7.pdf>.

- Miljøstyrelsen. 2018a. Affaldsstatistikken 2016. Miljøprojekt nr. 2020. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2018/06/978-87-93710-39-9.pdf>
- Miljøstyrelsen. 2018b. Genanvendelse af fosfor fra slammaske. Miljørapport nr. 1983. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2018/02/978-87-93614-71-0.pdf>
- Miljø- og Fødevareministeriet. 2018. Vejledning om økologisk jordbrugsproduktion. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Indsatsomraa der/Oekologi/Jordbrugsbedrifter/Vejledning_til_oekologisk_jordbrugsproduktion/Oekologivejledning_marts_2018.pdf
- Moore, J., Hegg, R.O., Scholz, D. & Strauman, E. 1975. Settling solids in animal waste slurries. Transactions of the ASAE 18(4), 694–698.
- Møller, H.B., Lund, I. & Sommer S.G. 2000. Solid–liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost. Bioresource Technolog, 74, 223–229.
- Møller, H.B. 2018. Upublicerede forsøgsdata.
- Møller, H.B., Hansen, J.D. & Sørensen C.A.G. 2007a. Nutrient recovery by solid-liquid separation and methane productivity of solids. Transactions of the ASAB, 50, 193–200.
- Møller, H.B., Jensen, H.S., Tobiasen, L. & Hansen, M.N. 2007b. Heavy metal and phosphorus content of fractions from manure treatment and incineration. Environmental Technology 28:12, 1403-1418
- Møller, H.B. & Nielsen, K.J. 2016. Biogas Taskforce- udvikling og effektivisering af biogasproduktionen i Danmark. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, 2016. 124 s.
- NaturErhvervstyrelsen. 2016. Bedre adgang til næringsstoffer for økologer Rapport fra arbejdsgruppen. København V: Miljø- og Fødevareministeriet. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Tvaergaaende/Oekologi/Bedre_adgang_til_naeringsstoffer_for_oekologer_-_Rapport_fra_arbejdsgruppen_-_September_2016.pdf
- Ndegwa, P.M., J. Zhu, and A. Luo. 2001. Effects of solid levels and chemical additives on removal of solids and phosphorus in swine manure. J. Environ. Eng. 127:1111- 1115.
- Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkærne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Callesen, I., Caspersen, O.H., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Olsen, T. M.. & Hansen, M.G. 2019a. Denmark's National Inventory Report 2019. Emission Inventories 1990-2017 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 886 pp. Scientific Report No. 318 <http://dce2.au.dk/pub/SR318.pdf>

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Mikkelsen, M.H., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Fauser, P., Albrechtsen, R., Hjelgaard, K.H., Bruun, H.G. & Thomsen, M. 2019b. Annual Danish Informative Inventory Report to UNECE. Emission inventories from the base year of the protocols to year 2017. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 549 pp. Scientific Report No. 313. <http://dce2.au.dk/pub/SR313.pdf>

Nissen, P. 2018. Personlig kommunikation.

Nyord, T. 2018. Personlig kommunikation.

Oberender, A., Andreasen, P., Tørsløv, J., Stubsgaard, A. & Bagge, L.. 2013. "Innovationspartnerskab for Anvendelse Af Fosfor Fra Spildevand Og Spildevandsslam Fra Spildevandsforsyninger. Miljøprojekt Nr. 1460. Copenhagen. <http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2013/01/978-87-92903-82-2.pdf>.

Pizzol, M., Smart, J.C.R. & Thomsen, M. 2014. External costs of cadmium emissions to soil: a drawback of phosphorus fertilizers. *Journal of Cleaner Production* 84, 475–483.

Pedersen, A.Ø. & Poulsen, H.D. 2003. Tilsat fytase i pelleteret slagtesvinefoder. SEGES Svineproduktion, Meddelelse 621, 13 sider.

Pedersen, J. 2007. Transport af gylle. Et praktisk studie over metoder til flytning af gylle. Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret. Farmtest nr. 61. Maskiner og planteavl.

Petersen, J. & Sørensen, P. 2008. Gødningsvirkning af kvælstof i husdyrgødning – Grundlag for fastlæggelse af substitutionskrav. DJF Rapport Markbrug nr 138. 111 sider.

Poulsen, H.D. 1995. Fordøjeligheden af fosfor i foderfosfater og kødbenmel bestemt efter regressionsmetoden. Forskningsrapport nr. 34, Statens Husdyrbrugsforsøg, Foulum, 20 sider

Poulsen, H.D. 1998. Fordøjeligheden af fosfor i foderfosfater. Grøn Viden, Husdyrbrug nr. 3, Danmarks JordbrugsForskning, 4 sider.

Poulsen, H.D. 2005. Effekt af varmebehandling på fordøjelighed af fosfor i korn og udvalgte proteinfodermidler. Internt notat, 5 sider.

Poulsen, H.D. 2007. Phosphorus availability in feed phosphate determined by regression. *Livestock Science* 109, 247-250.

Poulsen, H.D. 2019. Kvælstof og fosfor i husdyrgødning i Danmark – udvikling og status (under forberedelse).

Poulsen, H.D. (ed.) 2004-2017. Normtal for husdyrgødning 2004-2017. <http://anis.au.dk/normtal/>. (For hvert år findes et særskilt dokument, der angiver normtallene for husdyrgødning i det pågældende år).

Poulsen, H.D. & Rubæk, G. 2005. Fosfor i dansk landbrug. DJF rapport, Husdyrbrug nr. 68, 211 sider.

- Poulsen, H.D. & Tybirk, P. 2006. Fordøjeligheden af fosfor i fosforsyre og monocalciumfosfat. Meddelelse nr. 730, Videncenter for Svineproduktion, 6 sider.
- Poulsen, H.D. & Kristensen, V.F. (eds.) 1997. Normtal for husdyrgødning. En revurdering af danske normtal husdyrgødningens indhold af kvælstof, fosfor og kalium. Beretning nr. 736, Danmarks JordbrugsForskning, 165 sider.
- Poulsen, H.D., Jongbloed, A.W., Latimier, P. & Fernández, J.A. 1999. Phosphorus consumption, utilization and losses in France, The Netherlands and Denmark. *Livestock Production Science* 58, 251-259.
- Poulsen, H.D., Børsting, C.F., Rom, H.B. & Sommer, S.G. 2001. Kvælstof, fosfor og kalium i husdyrgødning – normtal 2000. DJF rapport nr. 36, Husdyrbrug, 154 sider.
- Poulsen, H.D., Blaabjerg, K. & Feuerstein, D. 2007. Comparison of different levels and sources of microbial phytases. *Livestock Science* 109, 255-257.
- Poulsen, H.D., Blaabjerg, K., Strathe, A., Ader, P. & Feuerstein, D. 2010. Evaluation of different microbial phytases on phosphorus digestibility in pigs fed a wheat and barley based diet. *Livestock Science* 134, 97-99.
- Poulsen, H.D., Blaabjerg, K., Nørgaard, J.V. & Kebreab, E. 2013. Production efficiency of monogastric animals. I: Sustainable Animal Agriculture (ed. Kebreab, E.) CAB International, 26-41.
- Poulsen, H.D., Voergaard, A.L., Strathe, A.B. & Blaabjerg, K. 2019. Wheat and barley increase phytate degradation and phosphorus digestibility in corn fed to pigs. *Animal Feed Science and Technology* 248, 77-84.
- Rapp, C., Lantzsich, H.J. & Drochner. 2001a. Hydrolysis of phytic acid by intrinsic plant or supplemental microbial phytase (*Aspergillus niger*) in the stomach and small intestine of minipigs fitted with re-entrant cannulas. 1. Passage of dry matter and total phosphorus. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 85, 406-413.
- Rapp, C., Lantzsich, H.J. & Drochner. 2001b. Hydrolysis of phytic acid by intrinsic plant or supplemental microbial phytase (*Aspergillus niger*) in the stomach and small intestine of minipigs fitted with re-entrant cannulas. 3. Hydrolysis of phytic acid (IP₆) and occurrence of hydrolysis products (IP₅, IP₄, IP₃ and IP₂). *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 85, 420-430.
- Regeringen. 2013. Ressourcestrategien Danmark uden affald - Genanvend mere, forbrænd mindre.
http://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Raadgivningspanel/moede_041113/Ressourcestrategi_WEB.pdf
- Rodenberg, J., Blaabjerg, K. & Poulsen, H.D. 2005. Fytat nedbrydes i våderfordertanken. *Hyologisk*, 24-25.
- Rubæk, G.H. Askegaard, M. & Christiansen NH. 2018. Gødningsværdi af fosfor i restprodukter. DCA rapport nr 141. DCA. Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet.

Sckerl, S.A. 2012. Historisk stor andel af spildevandsslam til jordbrug. brancheforeningen for genanvendelse af organiske ressourcer til jordbrugsformål. Teknik og Miljø.
http://www.ressourcegenanvendelse.dk/media/Historisk_stor_andel_af_spildevandsslam_til_jo.pdf

Scholz, R.W., Roy, A.H., Brand, F.S., Hellums, D.T. & Ulrich, A.E. 2014. Sustainable Phosphorus Management. A Global Transdisciplinary Roadmap. Scholz, R.W., Roy, A.H., Brand, F.S., Hellums, D., Ulrich, A.E. (Eds.). Dordrecht: Springer. doi:10.1007/978-94-007-7250-2.

Schoumans, O.F., Bouraoui, F., Kabbe, C., Oenema, O. & van Dijk, K.C.. 2015. Phosphorus management in Europe in a changing world. *Ambio* 44 (2), 180–92. doi:10.1007/s13280-014-0613-9.

Simons, P.C., Versteegh, H.A., Jongbloed, A.W., Kemme, P.A., Slump, P., Bos, K.D., Wolters, M.G., Beudeker, R.F. & Verschoor, G.J. 1990. Improvement of phosphorus availability by microbial phytase in broilers and pigs. *British Journal of Nutrition* 64, 525-540.

Slagelse Forsyning A/S, Slagelse Kommune & EnviDan A/S. 2017. Håndbog i behandling af KOD biopulp på rådnetanke. <https://genanvend.mst.dk/media/182105/haandbog-i-behandling-af-kod-biopulp-paa-raadnetanke.pdf>

Steenfeldt & Poulsen, 2012. Revurdering af indholdet af kvælstof og fosfor i moderne slagtekyllinger. *Dansk Erhvervsfjerkræ* 2, 128-129.

Steenfeldt, S. & Poulsen, H.D. 2018. Dansk proteinfoder til økologiske enmavede husdyr – Faglige muligheder og udfordringer. DCA Rapport nr. 114, 30 sider.

Sørensen, K.U., Tauson, A.-H. & Poulsen, H.D. 2018. Long term differentiated phosphorus supply from below to above requirement affects nutrient balance and retention, body weight gain and bone growth in growing-finishing pigs. *Livestock Science* 211, 14-20.

Sørensen C.G. & Møller H.B. 2006. Operational and economic modelling and optimization of mobile slurry separation. *Applied Engineering in Agriculture* 22, 185-193.

Sørensen, P., Poulsen, H.D., Rubæk, G.H., Vinther, F.P., Pedersen, B.F. & Kristensen, I.S. 2019. Andendelse af gødning i dansk landbrug i relation til indførelsen af fosforlofter. DCA rapport (under udgivelse).

Thomsen, M., Faber, J.H. & Sørensen, P.B., 2012. Soil ecosystem health and services – Evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. *Ecological Indicators* 16, 67–75. doi:10.1016/j.ecolind.2011.05.012.

Thomsen, M., With Ottosen, T & Nyrup Drejer, L 2015. Analyse af potentialer for ressourceudnyttelse i vand- og spildevandsforsyningen. Miljøministeriet, Naturstyrelsen. <https://ecoinnovation.dk/media/130961/analyse-af-potentialer-for-ressourceudnyttelse-i-vand-og-spildevandsforsyningen.pdf>

Thomsen, M., Seghetta, M, Mikkelsen, M.H., Gyldenkerne, S., Becker, T., Caro, D., Frederiksen, P., 2017. Comparative life cycle assessment of biowaste to resource management systems: A Danish case study. *Journal of Cleaner Production* 142, 4050-4058. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.034>.

Thomsen, M., 2016. Wastewater treatment and discharge. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 79 pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 193. <http://dce2.au.dk/pub/SR193.pdf>

Thomsen, M., Romeo, D., Caro, D., Seghetta, M. & Cong, R.G. 2018. Environmental-economic analysis of integrated organic waste and wastewater management systems: a case study from Aarhus City (Denmark). *Sustainability* 10(10), 3742. (IF: 2.075)

Thomsen, M., Seghetta, M. & Tremier, A. 2019. Post-treatment of digestate from collective biogas plants to improve nutrients recycling: a life cycle assessment. to be submitted to *Sustainability*, in prep.

Ton Nu, M.A., Blaabjerg & Poulsen, H.D. 2014. Effect of particle size and microbial phytase on phytate degradation in incubated maize and soybean meal. *Animal* 8, 534-541.

Tybirk, P. 2016. Justering af beregningsmodel til højere dosering af fytase. SEGES Svineproduktion, Notat nr. 1620, 12 sider.

van Bruggen, C. 2017. Personlig meddelelse.

van der Hoek, J. P., Duijff, R. & Reinstra, O., 2018. Nitrogen Recovery from wastewater: Possibilities, competition with other resources, and adaptation pathways. *Sustainability* 10, 4605; doi:10.3390/su10124605.

van Dijk, K.C., Lesschen, J.P. & Oenema, O. 2015. Phosphorus flows and balances of the European Union member states. *Science of The Total Environment* 542. Elsevier B.V.: 1078–93. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.08.048.

HUSDYRS FOSFORUDNYTTELSE OG FOSFORS VÆRDIKÆDE FRA HUSDYRGØDNING, BIOAFFALD OG SPILDEVAND

Faglig baggrundsrapport for fosforvidensyntese

I denne rapport præsenteres status for de globale fosforressourcer og der undersøges forskellige muligheder i forhold til at forbedre udnyttelsen af de nationale fosforressourcer og dermed mindske forbruget og udledningerne af fosfor til miljøet. Det kan man bl.a. gøre ved at sørge for en bedre fordeling af husdyrgødning mellem landsdelene. Det kræver at fosfor i husdyrgødningen opkoncentreres, med henblik på at mindske transportomkostningerne. Derudover er der et potentiale i forhold til at udnytte fosforressourcer i spildevandsslam og madaffald bedre og i forhold til at reducere fosforudskillelsen fra husdyrene, således at fosforindholdet i husdyrgødningen mindskes.