

Støttet af:



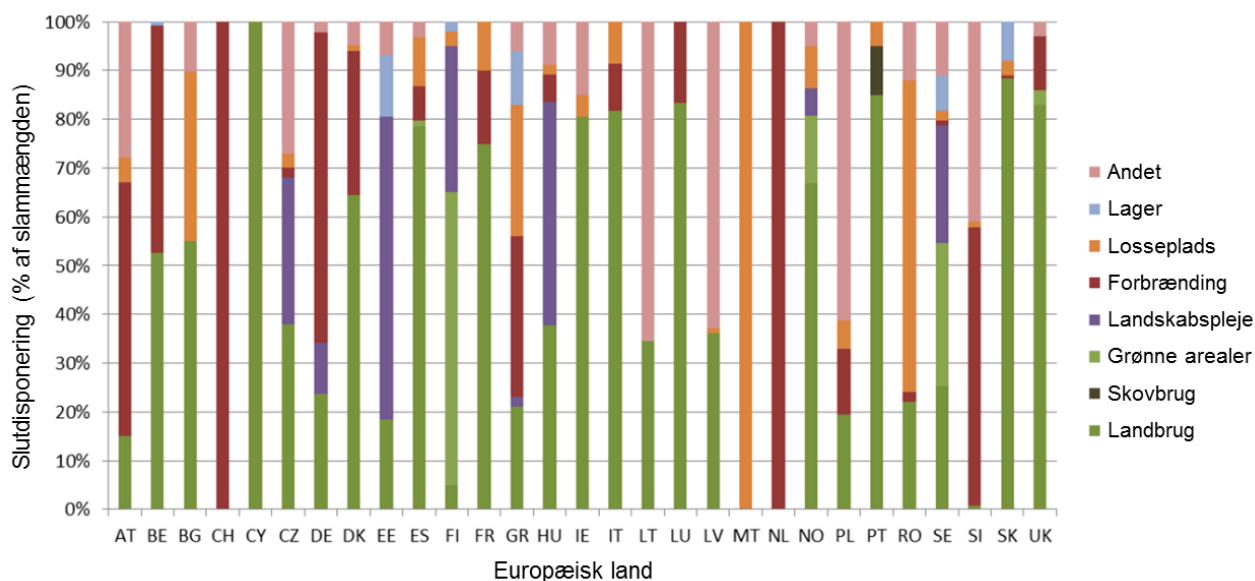
Planteavlsorientering: Udnyttelse af fosfor fra spildevandsslam

I Danmark tildeles langt størstedelen af fosfor med husdyrgødning, og i en lang årrække har der være tilført et overskud af P til jorden med det resultat at mange jorde har en høje fosfortal og ikke har behov for nye tilførsler af fosfor. Overskuddet af fosfor har dog over en årrække været faldende, således at der nu ses mere beskedne markoverskud, som i de senere år på landsplan har ligget i niveauet 2-4 kg P ha⁻¹ (Blicher-Mathiesen et al. 2016). Dette overskud dækker dog over en betydelig geografisk variation. Således ses der specielt i de østlige egne af landet, hvor husdyrtætheden er lavere, endda negative fosforbalancer (Andersen et al. 2016). Samtidig er der for Sjælland observeret en tendens til faldende P-tal, og en større andel af undersøgt jordprøver herfra viser kritisk lave P-tal (Knudsen og Schnugg 2016). I disse tilfælde kan det være aktuelt at kigge efter alternative fosforkilder. Tilførsel af P-holdige restprodukter kan være en billig løsning til at øge jordens fosforstatus. Spildevandsslam er det restprodukt fra byerne, som udgør den største fosforpulje. Anvendelse af fosfor fra spildevandsslam er derfor vigtigt for at opnå en høj udnyttelse af samfundets fosforressourcer.

Anvendelse af spildevandsslam i Danmark og Europa

I Danmark udnyttes omkring to tredjedele af spildevandsslammet til udbringning på landbrugsjord. Størstedelen af det resterende slam forbrændes, hvorefter asken deponeres eller indgår i byggematerialer. Der er en betydelig regional skævvridning i udnyttelsen af spildevandsslam i Danmark. Således er det kun omkring halvdelen af slammet i området Sjælland og øerne (Region Hovedstaden + Region Sjælland), der udbringes på landbrugsjord. Dette skyldes, at en stor del af slammet fra hovedstadsområdet forbrændes på de tre store slamforbrændingsanlæg ved Lynetten, Avedøre og Mølleåværket.

Kigger man på hele Europa, er der en meget stor variation i hvordan slammet anvendes (Figur 1). I nogle lande, f.eks. Storbritannien, Portugal og Luxembourg udnyttes mere end 80 % ved udbringning på landbrugsjord. I Holland og Schweiz derimod har man indført et forbud mod udbringning af spildevandsslam på landbrugsjord. Dette betyder at alt slam forbrændes og at man pt. ikke udnytter det fosfor slammet indeholder.



Figur 1: Slutdisponering af spildevandsslam i 29 europæiske lande. Figuren stammer fra Kabbe 2017 (oversat fra engelsk).

Aske fra spildevandsslam har ikke traditionelt set været anvendt på landbrugsjord. Dels fordi den anses for at have et for højt indhold af tungmetaller, og dels fordi det ofte antages at fosforet i asken ikke er plantetilgængeligt. Nyere undersøgelser viser dog, at asken godt kan bidrage med plantetilgængeligt P.

I de senere år er der udviklet en række teknologier med det formål at producere P-holdige produkter fra spildevand, som i højere grad minder om handelsgødning. Især har der været fokus på teknologier til udfældning af struvit. I dag kører der således tre anlæg i Danmark og 40 anlæg til struvit udfældning på verdensplan (Kabbe og Kraus 2017). Derudover har der været stor fokus på at udvikle teknologier, som kan reducere tungmetalindholdet og øge plantetilgængeligheden af P fra slamaske. Men endnu er ingen af den type teknologier implementeret i fuldskala (Kabbe og Kraus 2017).

Fosforgødningsvirkning

Spildevandsslam indeholder typisk omkring 2-4 % fosfor i tørstoffet. Generelt vil spildevandsslam være en god kilde til fosfor. Især ved moderat P-status i jorden og for afgrøder med normale fosforbehov kan P fra spildevandsslam være en fosforkilde på lige fod med fosfor fra handelsgødning, som kan anvendes til at opretholde en moderat P-status. Hvor man skal være mere opmærksom er, hvis slammet skal anvendes på jorder med lav P-status eller til afgrøder med særlige krav til fosforforsyningen.

Gødningsvirkningen af fosfor i spildevandsslam kan være svær at fastlægge, og det er svært at vurdere gødningsvirkningen alene ud fra analyser af slammet. Viden om slammets gødningsvirkning må derfor baseres på forsøg udført enten med analyser af tilgængeligheden efter tilførsel til jord eller i potteforsøg, eller baseret på markforsøg.

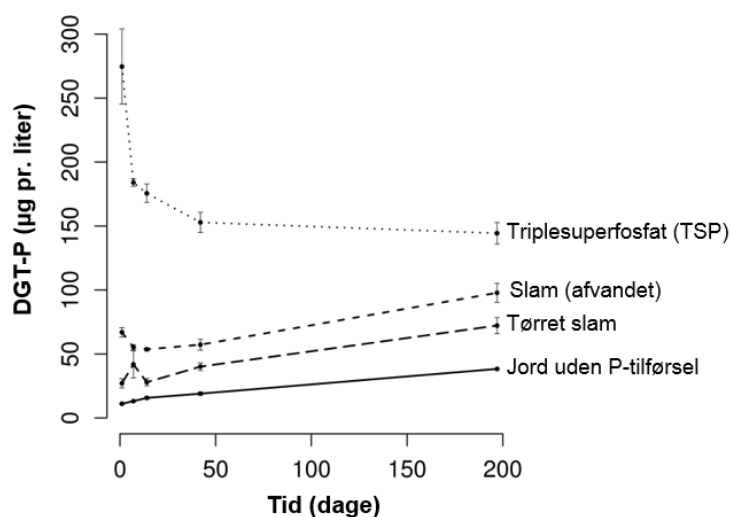
Generel virkning af slam

I litteraturen kan man finde alt fra ingen virkning, eller decideret negativ virkning, til virkninger på over 100 % sammenlignet med almindeligt handelsgødningsfosfor. Danske forsøg peger dog generelt mod en gødningsvirkning på omkring 50-80 % [vurderet ud fra tabel over forskellige forsøg], som vil afhænge af den specifikke slam og de dyrkningsmæssige forhold. Der kan selvfølgelig forekomme slamtyper og forhold, som vil give en lavere eller højere gødningsvirkning, men det vurderes at gødningsvirkningen oftest vil lægge inden for det interval. Derudover bør det nævnes, at under forhold med moderat P-status, hvor gødningen primært anvendes til at opretholde fosforstatus i jorden, vil virkningen typisk være i den høje ende og kan sagtens være omkring de 100 %.

Effekten af slam i forhold til handelsgødningsfosfor kan generelt forventes at stige over tid. Umiddelbart efter tilførsel til jorden vil der typisk være en væsentligt højere tilgængelighed efter handelsgødningsfosfor end efter slam. Men efterhånden som tiden går, vil det lettilgængelige fosfor fra handelsgødningen binde sig til jordens partikler og blive mindre tilgængeligt. Dette kan også ske fra slammet, men dette fald vil typisk være meget mindre. Der kan endda ske en stigning i tilgængelighed over tid, blandt andet fordi noget af det organisk bundne P i slammet mineraliseres. Dermed udlignes forskellen mellem slam og handelsgødningsfosfor over tid. Dette er illustreret i figur 2, hvor det fremgår, hvor der over 197 dage ses et fald i tilgængeligheden fra triplesuperfosfat, men en stigning fra slammet. Udviklingen i figuren tyder på, at

hvis forsøget havde fortsat over længere tid end de 197 dage, ville de ramme hinanden eller endda krydse. Resultaterne viser, at slam måske er mindre velegnet under forhold, hvor der kræves en hurtig fosforeffekt (f.eks. som startgødning), mens det kan forventes at have vil have en god langtidsvirkende effekt og en væsentlig eftervirkning. I Landsforsøg afleveret i Oversigten 2016 blev der dog ikke fundet signifikant eftervirkning af hverken triplesuperfosfat eller slam, men der var en tendens til eftervirkning, når slam og triplesuperfosfat blev tilført sammen.

Virkningen af slam i forhold til triplesuperfosfat kan i øvrigt være afhængig af jordens egenskaber. I forsøg ved Københavns universitet, hvor jernfældet slam fra fem forskellige danske renseanlæg blev tilført til to forskellige jorder med samme tekstur men med forskellige pH, var der stor forskel på tilgængeligheden af fosfor. I jord med $pH_{\text{vand}} = 5.8$ lå effekten relativt til triplesuperfosfat på 51 til 77 %. I jord med $pH = 7.8$ var effekten for de samme slam på 20 til 37 % (Lemming 2017). Denne store effekt af jordens pH er ikke tidligere set, og det kræver yderligere undersøgelse at få det dokumenteret, blandt andet i forsøg, hvor der også indgår planter.



Figur 2. Udvikling i fosfortilgængelighed i jord (målt som DGT-P) efter tilførsel af TSP, slam og tørret slam. Figuren stammer fra Lemming et al. 2017a.

Tørret slam

Tørring af slam øger graden af hygiejnisering, øger lagerstabiliteten, samt resulterer i en betydelig reduktion i volumen. Tørring af slam synes dog at have en negativ effekt på plantetilgængeligheden af fosfor fra slammet. I forsøg med frisk (afvandet) slam og tørret slam udført på Københavns universitet var tilgængeligheden af fosfor i jorden tydeligt lavere efter den tørrede slam sammenlignet med den afvandede slam (se figur 2). Samtidig var udnyttelsen af fosfor i et potteforsøg med vårbyg omtrent halvt så stor fra den tørrede slam som fra afvandede slam (Lemming et al. 2017a). Lignende effekter af tørring er fundet i udenlandske undersøgelser (Smith et al. 2002).



Figur 3. Piller af tørret slam fra Randers centralrenseanlæg.

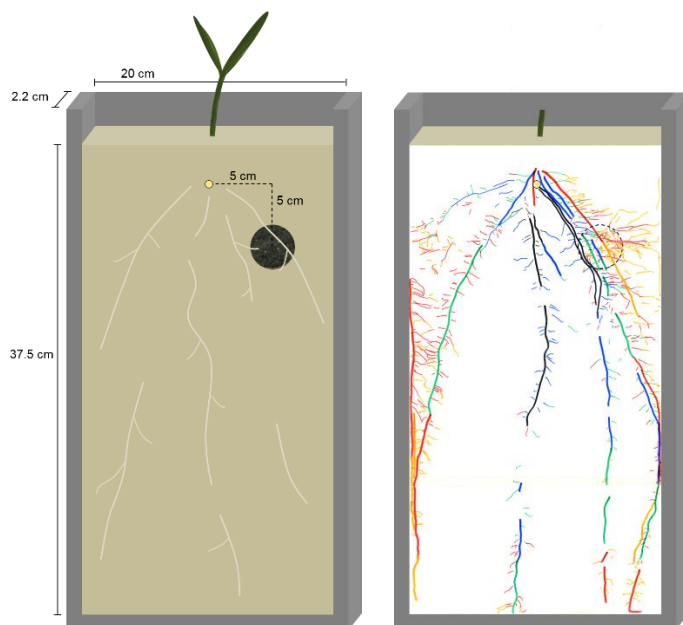
Fældning med jern og aluminium

Renseanlæggets fjernelse af fosfor fra spildevandet sker enten biologisk eller ved fældning med jern- eller aluminiumsalte. På danske renseanlæg anvendes dog oftest en kombination. Den anvendte metode, samt dosering af metalsaltene, kan have en betydning for slammets gødningsvirkning. Der er således flere resultater, der tyder på at ren biologisk fjernelse resulterer i en større tilgængelighed af fosfor, end hvis der er brugt jern- eller aluminiumsalte (Glæsner et al. 2016). Derudover er der også en tendens til at højere doseringer af jern- eller aluminiumsaltene, og dermed højere koncentrationer af disse metaller i slammet i forhold til fosforindholdet, giver en negativ effekt på gødningsvirkningen (Lemming 2017, Øgaard og Brod 2016) + Analyser jern- og aluminiumkoncentrationen i slammet, sammen med fosforkoncentrationen, kan give en idé, om hvordan forholdet mellem metaller og fosfor ((Al+Fe)/P-molforholdet) ligger i den specifikke slam. Dette er dog ikke en del af de standardanalyser, der foretages på slam før udbringning.

Hvorvidt fældning med jern er bedre end aluminium eller omvendt, er ikke helt entydigt. Flere studier har dog vist en bedre effekt af jernfældet slam end af aluminiumfældet slam (Lemming 2017, Øgaard og Brod 2016, Delin 2016). Dette er umiddelbart i modsætning til resultater fra Landsforsøgene af rapporteret i Oversigt over landsforsøgene 2016, hvor den aluminiumfældede slam havde en tydeligt bedre virkning end den jernfældede slam. Dette kan dog skyldes, at den jernfældede slam, som blev anvendt i forsøgene havde en meget høj jernkoncentration, som kan have bevirket den dårlige virkning.

Placering af slam

Forsøg med placering af slam til majs tyder på at placering af slam ikke kan anbefales. Figur 4 viser forsøgsopstillingen i et forsøg med observation af majsrødders vækst omkring placeret slam (Lemming et al. 2016). Selvom majsenes rødder gerne voksede hen omkring slammet, og der blev udviklet en større tæthed af rødder i slamområdet end i den øvrige jord, så optog planterne ikke mere fosfor fra slammet, end hvis slammet var blevet blandet ind i jorden. Faktisk var det samlede fosforoptag en smule mindre fra det placerede slam end fra det iblandede slam. I samme forsøg blev der fundet en stor effekt af placering af triplesuperfosfat på både fosforoptag og rodvækst (Lemming et al. 2016). I forsøget blev anvendt majs. I praksis er placering af slam til majs ikke aktuelt, men det er sandsynligt, at heller ikke placering til eksempelvis vårbyg vil give en god effekt.



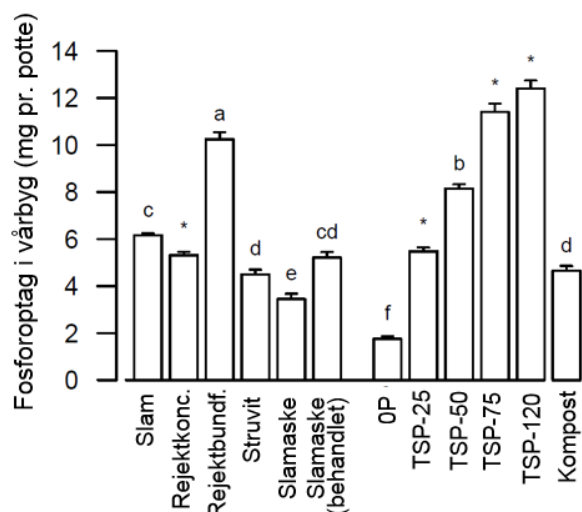
Figur 4. Forsøg med robservationer ved placering af spildevandsslam til majs. Til venstre ses en principskitse af opsætningen i rodbokse, som tillader observation af rødderne gennem en plexiglas-plade på boksens ene side. Til højre ses røddernes udbredelse 4 uger efter såning. Den stiplede cirkel markerer placeringen af slammet. Figuren er modificeret efter Lemming et al. 2016.

Virkning af slam i forhold til andre organiske fosforkilder og restprodukter

For at prioritere udnyttelse og anvendelse af forskellige fosforressourcer kan det være relevant at vurdere fosforeffekten i forhold til andre potentielle fosforkilder.

Effekter på kort sigt

Figur 5 viser resultater af et potteforsøg med vækst af vårbyg 6 uger i drivhus efter tilførsel af forskellige fosforkilder. Den anvendte slam stammer fra Avedøreværket i København, hvor spildevandsbehandlingen inkluderer en kombination af biologisk fosforfjernelse og fældning med jern. I forsøget havde slammet en fosforgødningseffekt på 69 % relativt til TSP (triplesuperfosfat). Struvit havde en lidt lavere effekt på 47 % relativt til TSP, hvilket er relativt lavt i forhold til at andre forsøg, hvor der er fundet effekter på omkring 100 %. Aske fra Avedøreværket havde en væsentligt lavere virkning på kun 27 %. Den behandlede aske (aske fra Avedøreværket, der var blevet termokemisk behandlet i Tyskland) havde en bedre virkning end den ubehandlede aske, og var ikke signifikant forskellige fra slammet. De to produkter rejektkoncentrat og rejektbundfald stammer fra en pilotafprøvning af inddampning af rejektvand på Avedøre renseanlæg. Især bundfaldet havde en ret god virkning, bedre end samme mængde P tilført med TSP (TSP-50). Selve teknologien vurderes dog ikke at være rentabel og produktion af produkterne i storskala er sandsynligvis ikke realistisk (se også [Faxå et al. 2016](#)). I forsøget var også inkluderet en kompost baseret på organisk husholdningsaffald og haveparkaffald (produceret med AIKAN-teknologien, hvor materialet bioforgasses før det komposteres). Denne kompost havde en dårligere virkning end slammet, med en effekt relativt til TSP på kun 45 %. Det er vigtigt at bemærke, at resultaterne, der er vist i figur 5 kun stammer fra et enkelt forsøg, og at man skal passe på med at generalisere resultaterne til alle typer af de pågældende restprodukter.



Figur 5. Fosforoptag i vårbyg 6 uger efter såning efter tilførsel af forskellige fosforkilder (50 mg P pr. kg jord). TSP-25 til 120 angiver forskellige mængder af tilført P med triplesuperfosfat (25 til 120 mg P pr. kg). Forskellige bogstaver over søjlerne indikerer signifikant forskellige behandlinger. En stjerne over søjlen viser at der er tilført en anden mængde end 50 mg P pr. kg. Figuren stammer fra Lemming et al. 2017b.

Effekter på længere sigt

Den langsigtede virkning af slam i forhold til at andre organiske fosforkilder er blevet undersøgt ved brug af jord fra det såkaldte CRUCIAL-forsøg på Københavns Universitets forsøgsmarker. I CRUCIAL-forsøget er der siden 2003 blevet tilført forskellige typer af restprodukter/organiske gødninger, herunder spildevandsslam, kompost og kvægmøg. Analyser af jordprøver udtaget fra markforsøget i 2015, dvs. efter 12 års tilførsler, har vist at det fosfor der er tilbage i jorden efter slamtilførslerne er væsentligt mere tilgængeligt end det, der er tilbage efter tilførsel af kompost. Forskellen i langtidsforsøget mellem slam og kompost, minder om det der blev fundet i korttidsforsøget (se Figur 1) med anvendelse af slam og kompost fra samme oprindelse. Sammenlignet med fosfor fra kvægmøg, var fosfor i jorden efter slamtilførslerne mindre tilgængeligt.

Litteratur

Faxå, J., Madsen, J.A., Thornberg, D., Lemming, C. (2016): Genanvendelse af Fosfor og Kvælstof ved inddampning af rejecktand - GAFOKIR projekt. Naturstyrelsen.

Glæsner, N., Lemming, C., Magid, J., Jensen, L.S. (2016): Review af eksisterende viden om plantetilgængelighed af fosfor i forskellige slamprodukter. Rapport for Miljøstyrelsen, udgivet af Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet. 21 s.

Kabbe, C. (2017). Sewage sludge valorization / disposal routes Germany and Europe. Kompetenz Zentrum Wasser Berlin.

Kabbe, C. og Kraus, F. (2017). P recovery: from evolution to revolution. Fertilizer International 479, July-August 2017

Lemming, C., Oberson, A., Hund, A., Jensen, L.S., Magid, J. (2016): Opportunity costs for maize associated with localised application of sewage sludge derived fertilisers, as indicated by early root and phosphorus uptake responses. *Plant and Soil* 406, 201–217.

Lemming, C. (2017): Recycling phosphorus from wastewater – Plant availability of phosphorus from sewage sludge and related products. PhD-afhandling, Københavns Universitet, afleveret august 2017.

Lemming, C., Scheutz, C., Bruun, S., Jensen, L.S., Magid, J. (2017a): Effects of thermal drying on phosphorus availability from iron-precipitated sewage sludge. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (in press).

Lemming, C., Bruun, S., Jensen, L.S., Magid, J. (2017b): Plant availability of phosphorus from dewatered sewage sludge, untreated incineration ashes and other products recovered from a wastewater treatment system. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (in press).

Øgaard, A.F., Brod, E. (2016). Efficient Phosphorus Cycling in Food Production: Predicting the Phosphorus Fertilization Effect of Sludge from Chemical Wastewater Treatment. *J. Agric. Food Chem.* 64.