



NUMMER 49

DECEMBER 2001



## Slam på marken: risiko eller ressource?

Tema ved Centret for bæredygtig arealanvendelse



# MILJØFORSKNING

DET STRATEGISKE MILJØFORSKNINGSPROGRAM

# ORDFORKLARINGER

<b>Adsorbtion</b>	Binding af stoffet til ydre og indre partikeloverflader
<b>Apolaritet</b>	I apolære stoffer er elektronskyen omkring kernerne i molekylet mere ligeligt fordelt, hvilket bevirker, at stoffet kun i ringe grad er blandbart med vand, som er en meget polær væske. Apolære stoffer binder sig gerne til andet apolært stof, eksempelvis det organiske stof i jorden
<b>Biotilgængelig</b>	Den del af stofmængden, der er tilgængelig for biologisk omsætning
<b>Desorptionskinetik</b>	Det dynamiske forløb for frigivelsen af et stof fra partikeloverflader
<b>Desorptionsrate</b>	Den rate, hvormed et stof frigives fra sin binding til partikeloverflader
<b>Halveringstid</b>	Den tid det tager for bakterierne at nedbryde halvdelen af den oprindelige stofmængde
<b>Suspenderet materiale</b>	Organiske og uorganiske partikler, der er opslemmet i vand

## INDHOLDSFORTEGNELSE

- 4** Indledning  
Miljøfremmede stoffer fra slam  
- nedbrydning og effekter i marken  
af *Kaj Henriksen*
- 6** Nedbrydning af miljøfremmede stoffer  
i rensningsanlæg og ved efterfølgende  
aerobe/anaerobe behandlingsformer  
af *Anders S. Mogensen, Frank Haagensen, Birgitte K. Ahring,  
Jacob Møller, Ulrik Reeh og Pia Mai*
- 9** Nedbrydning af miljøfremmede stoffer i  
jord-plantesystemer og optag i planter  
af *Gerda Krog Mortensen, Liv Kure, Per Ambus,  
Frank Laturnus og Christian Grøn*
- 12** Nedbrydning af miljøfremmede  
organiske stoffer i slamgødsket markjord  
Af *Kaj Henriksen, Martin Hesselsøe, Torben Madsen,  
Hubert de Jonge og Lis de Jonge*
- 15** Effekter af LAS på  
indholdet af smådyr i slam  
Af *Paul Henning Krogh*
- 17** Miljøeffekter af  
organisk affald på dyrkningsjorden  
Af *Søren O. Petersen og Dorte Rasmussen*
- 20** Gødningsværdi af organisk affald  
Af *Jens Petersen*
- 23** Miljøforurening fra rester af antibiotika  
i organisk affald og husdyrgødning  
Af *Bent Halling-Sørensen*
- 28** Forfatteroplysninger  
Miljøforskning nr 49
- 29** Bestilling af materiale fra  
Det Strategiske Miljøforskningsprogram
- 30** [www.smp.au.dk](http://www.smp.au.dk)
- 32** Ny bog fra  
Det Strategiske miljøforskningsprogram:  
Bæredygtighed, økonomi og velfærd  
Af *Peder Andersen, Jørgen Birk Mortensen og Helle Ørsted Nielsen (red.)*

## K O L O F O N

MILJØFORSKNING:  
Nyhedsbrev for  
Det Strategiske  
Miljøforskningsprogram  
Nr. 49, december 2001

ISSN 0907-4678

REDAKTION:  
Kaj Henriksen,  
Aalborg Universitet  
Lars Elsgaard,  
Danmarks JordbrugsForskning  
Bo Bjerre Jakobsen  
Helle Ørsted Nielsen (ansv.)

LAYOUT:  
Søren Larsen

OPLAG:  
3400

TRYK:  
Zeuner Grafisk as,  
Århus

Trykt på 115 g  
Arctic Volume  
100% vegetabiliske farver

RETURADRESSE:  
Det Strategiske  
Miljøforskningsprogram  
Forskerparken  
Gustav Wieds Vej 10 C  
8000 Århus C

Eftertryk af artikler kun  
tilladt efter aftale

KONTAKT TIL SEKRETARIATET:  
Tlf.: 86 20 50 83  
Fax: 86 13 59 10  
E-post: [smp@smp.au.dk](mailto:smp@smp.au.dk)

Internet: [www.smp.au.dk](http://www.smp.au.dk)

# Miljøfremmede stoffer fra slam – nedbrydning og effekter i marken

Af Kaj Henriksen

## Introduktion

I de seneste 20 år har der været stillet krav til kvaliteten af spildevandsslam, der spredes ud på landbrugsjorden. Tilbage i 1970'erne og 1980'erne blev der sat fokus på samfundets forbrug og udledning af tungmetaller. Det skete på baggrund af en række tungmetalskader i vandmiljøet. De første danske krav til spildevandsslam omfattede derfor et sæt grænseværdier for indholdet af tungmetaller på linie med et sæt værdier fastsat i EU-regi. Siden er de danske grænseværdier for tungmetaller sænket betydeligt.

Udenlandske undersøgelser i starten af 1990'erne viste, at spildevandsslam fra kommunale rensningsanlæg kunne indeholde et bredt spektrum af miljøfremmede organiske stoffer. Mange af disse stoffer har uønskede effekter i miljøet, når de forekommer i for høje koncentrationer. Systematiske undersøgelser i 1995 og 1996 af mere end 50 organiske miljøfremmede stoffer på en række danske rensningsanlæg resulterede i, at Miljøstyrelsen i 1997 indførte afskæringsværdier for fire grupper af miljøfremmede organiske stoffer i spildevandsslam (tabel 1 og boks 1). Disse afskæringsværdier blev skærpet yderligere pr. 1 juli 2000 med henblik på at fremme udfasning/substituering af stofferne fra deres kredsløb i samfundet, hvor det er muligt.

Spildevandsslam udgør langt den største mængde af det organiske affald fra byerne, som genanvendes i jordbruget. I 1999 overholdt omkring 60% af den samlede produktion på 155.000 ton slam (tørstof) grænseværdierne. De godt 56% blev genanvendt direkte på landbrugsjord og 5% blev placeret i slammineraliseringsanlæg med henblik på efterfølgende landbrugsanvendelse. På grund af miljøafgifter er det væsentligt dyrere at afbrænde eller deponere slammet frem for at udbringe det på landbrugsjorden. Der er derfor et stærkt ønske om at kunne nedbringe indholdet af de miljøfremmede stoffer enten ved ændringer i driften på rensningsanlægget eller ved efterbehandling af det afvandede slam. Ligeledes er

der et stærkt ønske om at kende skæbnen og effekten af de miljøfremmede stoffer, der spredes på marken.

Center for bæredygtig arealanvendelse og forvaltning af kulstof, kvælstof og miljøfremmede stoffer, i daglig tale Centret for bæredygtig arealanvendelse, blev oprettet under Det Strategiske Miljøforskningsprogram 1997-2000 (SMP97). Ud-

»Udenlandske undersøgelser i starten af 1990'erne viste, at spildevandsslam fra kommunale rensningsanlæg kunne indeholde et bredt spektrum af miljøfremmede organiske stoffer«

gangspunktet for centret var den hektiske debat i 1995-96 om miljøfremmede stoffer i spildevandsslam og dermed om slammets anvendelse på landbrugsjord. Formålet med centrets forskning har været at fremskaffe viden og metoder, der kan benyttes til en prioritering af indsatsen på området miljøfremmede stoffer i organisk affald, herunder især

spildevandsslam som anvendes på landbrugsjord. Som en del heraf er det organiske affalds gødningsværdi og jordforbedrende effekt også undersøgt.

## Resultaterne

af 3 års forskningsarbejde Miljømæssigt kan der stilles tre primære krav til kvaliteten af det organiske affald, der ender på landbrugsjorden:

1. Slammet bør ikke indeholde stoffer, der ved normal dosering har alvorlig giftvirkning på nyttedyr og planter.
2. Slammet bør ikke indeholde stoffer, der ved normal dosering leder til en akkumulering af stoffer i jord eller fødekæder.
3. Slammet bør ikke indeholde stoffer, der ved normal dosering forurener grund eller overfladevand.

Ud fra de resultater, der er opnået i centrets 3-årige forskningsperiode, må vi konkludere, at slammet med de nugældende afskæringsværdier for de undersøgte stoffer opfylder de ovenstående krav. Artiklerne i dette temahæfte belyser og uddyber nogle af de delkonklusioner, der ligger til grund for den samlede vurdering.

**Tabel 1**

	Afskæringsværdi (1.7.1997) mg/ kg ts	Afskæringsværdi (1.7.2000) mg/ kg ts
LAS	2600	1300
PAH (total)	6	3
NPE	50	30*
DEHP	100	50

Afskæringsværdier for miljøfremmede organiske stoffer i spildevandsslam anvendt på landbrugsjord

\* Afskæringsværdien for NPE sænkes yderligere til 10 mg/kg tørstof i 2002

## Boks 1

### Kilder til forekomsten af miljøfremmede organiske stoffer i affald

Lineære alkylbenzen sulfonater (LAS) udgør hovedparten af anvendte anioniske detergenter i vaskemidler og tilføres rensningsanlæggene fra industri og husholdning.

Nonylphenolethoxylaterne (NPE) er en gruppe af non-ioniske detergenter, som gennem en frivillig brancheaftale er udfaset fra dansk-producerede vaskemidler og fra år 2000 også fra anvendelsen som bærestoffer i pesticider. De findes dog i importerede produkter, bl.a. tekstilfarver, og forekommer derfor stadig i en række industrielle produktioner.

Phtalater anvendes hovedsagelig som blødgørere i PVC, men de benyttes også i begrænset omfang i fx fugemasse, maling og trykfarve. Af de anvendte phtalater er DEHP (di-(ethylhexyl)phtalat) den mest benyttede og udgør globalt ca. 50% af den samlede produktion.

Polyaromatiske hydrocarboner (PAH'er) stammer hovedsagelig fra rester af olieprodukter ved afbrænding og spild.

Der indledes med en artikel, som gennem et eksempel viser, hvordan forskningen har påvist en mulighed for øget nedbrydning af miljøfremmede stoffer under anaerobe forhold. Artiklen konkluderer, at biotilgængeligheden af de miljøfremmede stoffer er afgørende for deres nedbrydning. Forskerne beskriver videre, at efterbehandling af slam ved kompostering er en effektiv teknik til at nedbringe indholdet af miljøfremmede stoffer.

I artiklerne 2 og 3 præsenteres udvalgte eksempler på de miljøfremmede stoffers videre skæbne ved udbringning af afvandet slam i marken. I laboratorium- og feltforsøg er planteoptag, omsætning og udvaskning undersøgt. Resultaterne viser, at en række planter er i stand til at optage miljøfremmede stoffer, der findes i spildevandsslam, men at det ikke sker i måleligt omfang under realistiske markforhold. Omsætningen af LAS, NP og DEHP er forsinket under markforhold som følge af iltbegrænsning i slamklumperne, men mere end 90% af stofferne nedbrydes inden for 1 år.

Tildeling af slam efter gældende grænseværdier medfører ikke en ophobning af miljøfremmede stoffer i jorden.

Artikel 4 præsenterer eksempler på effekten af de miljøfremmede stoffer på jordboende dyr. Et højt indhold af LAS i slam hæmmer væksten af smådyr. Men dyrene genetablerer deres normale antal efter, at LAS er omsat ved biologisk nedbrydning. Feltforsøg viser, at grænseværdien på 1.3 g LAS pr. gram slam kan give en akut effekt, der svarer til en nedgang i dyrenes antal på omkring 10%.

Artikel 5 præsenterer eksempler på miljøeffekterne af det organiske affald på dyrkningsjorden, herunder en risikovurdering af kort- og langtidseffekterne af de miljøfremmede stoffer på jordmiljøet. Artiklen konkluderer, at organisk affald stimulerer jordens mikroorganismer samtidig med, at der kan være negative effekter af miljøfremmede stoffer. Individuelle grupper af mikroorganismer kan være særlig følsomme overfor stofferne, men effekter på jordens funktioner er begrænsede. Modelbereg-

ninger viser, at de undersøgte organiske miljøfremmede stoffer i affaldsprodukter ikke udgør en risiko for miljøet, hvis de gældende afskæringsværdier er overholdt.

Dyrkningsjordens kvalitet vurderes bl.a. på grundlag af jordens evne til at opretholde produktivitet, som i høj grad er forbundet med næringsstofforsyning. I artikel 6 præsenteres resultater vedrørende det organiske affalds gødningsværdi. Det konkluderes, at mængden af næringsstoffer i organiske affaldsprodukter er beskeden og uden overordnet betydning for dansk landbrug. På markniveau kan affaldsprodukterne ikke dække kornets næringsstofbehov, og derfor er der altid behov for tilførsel af supplerende mineralsk kvælstof og ofte også kalium.

En anden gruppe af stoffer, som forekommer i husdyrgødning og slam, er rester af antibiotika, som anvendes til bekæmpelse af sygdomme hos dyr og mennesker, eller som gives til svin for at fremme væksten. Ved centrets etablering var der meget begrænset viden om disse stoffers forekomst, og om de kunne udgøre en trussel mod miljøet. I artikel 7 præsenteres dette forskningsarbejde. Resultaterne viser, at 10% til 25% af den antibiotika, der anvendes til grise, kan genfindes i gyllen. Her nedbrydes en del af stofferne, mens andre overføres til landbrugsjorden, hvor de

kan gøre skade på levende organismer. Blågrønaler og bakterier er meget følsomme overfor antibiotika, hvorimod regnorme, krebsdyr og springhaler er nærmest ufølsomme.

Artiklerne i temahæftet er eksempler på den viden, der er opnået gennem forskningen i *Centret for bæredygtig arealanvendelse*. Andre og mere detaljerede oplysninger findes i en række videnskabelige artikler, der er skabt på baggrund af centrets aktiviteter. Temahæftet opremser ikke disse artikler, men yderligere oplysninger om de enkelte projekter kan fås ved henvendelse til artiklernes forfattere. En komplet adresseliste findes bagest i temahæftet.

Forskere fra følgende institutioner har deltaget i forskningscentret og bidraget til dette nummer af *Miljøforskning*: Aalborg Universitet, Danmarks Farmaceutiske Højskole, Danmarks JordbrugsForskning, Danmarks Miljøundersøgelser, Danmarks Tekniske Universitet, DHI – Institut for Vand og Miljø, Forskningscenter Risø, Forskningscenter for Skov og Landskab og Teknologisk Institut. ■

# Nedbrydning af miljøfremmede stoffer i rensningsanlæg og ved efterfølgende aerobe/anaerobe behandlingsformer

Af Anders S. Mogensen, Frank Haagensen, Birgitte K. Ahring, Jacob Møller, Ulrik Reeh og Pia Mai

Studier af anaerob nedbrydning af LAS viser, at biotilgængeligheden af miljøfremmede stoffer er afgørende for deres omsætning i rensningsanlæg og ved efterfølgende anaerobe behandlingsformer. Miljøfremmede stoffer, der er ophobet i spildevandsslam, kan fjernes ved kompostering.

Nr 48  
SIDE 6

Spildevand er forurenet med miljøfremmede organiske stoffer, der tilhører flere forskellige stofgrupper. I indløbet til danske rensningsanlæg findes bl.a. phenoler, klorerede phenoler, aliphater, PAH'er, blødgørere og overfladeaktive stoffer. Flere af de miljøfremmede stoffer kan påvirke vandmiljøet med akutte eller kronisk effekter. Ligeledes er flere af stofferne klassificerede som kræftfremkaldende, mutagene eller teratogene (fosterskadelige).

På grund af tilstedeværelsen af miljøfremmede stoffer er det ikke tilstrækkeligt at fokusere på at fjerne organisk stof og næringsstoffer ved rensning af spildevand. Nedbrydning af miljøfremmede organiske stoffer bør ligeledes inddrages i rensningsanlæggets driftsstyring.

## Miljøfremmede

stoffer i rensningsanlæg

I spildevandet og rensningsanlægget fordeler de miljøfremmede stoffer sig mellem luft, vand og organisk materiale, alt efter stoffernes fysiske og kemiske egenskaber. Mikroorganismer i rensningsanlægget kan udnytte de miljøfremmede stoffer som kilde til kulstof

og energi, men kun hvis stofferne er biotilgængelige. Da mikroorganismer optager deres substrat fra vandfasen, er den biologiske omsætning af stofferne afhængig af fordelingen mellem luft, vand og organisk materiale. Stoffer med lipofile (fedtelskende) egenskaber binder sig til slammene, og de fjernes dermed fysisk fra selve spildevandet. Dette sker allerede ved den primære fældning, men også sekundært slam indeholder en stor mængde af lipofile miljøfremmede stoffer. Det betyder, at en stor del af stofferne ikke gennemgår rensningsanlæggets aerobe trin, men føres med slammene direkte over til den anaerobe behandling.

## Nedbrydning

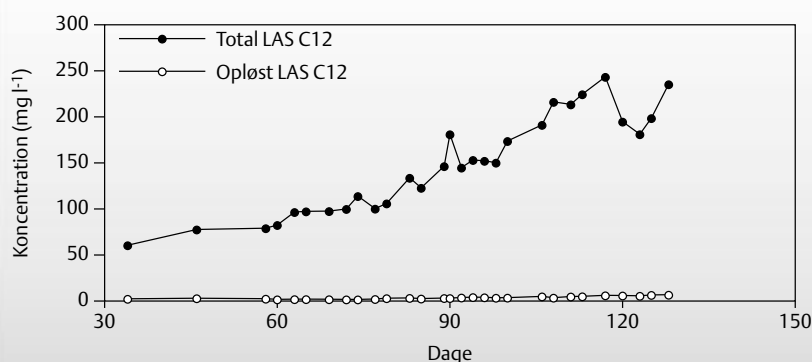
under aerob behandling I et traditionelt rensningsanlæg sker den aerobe omsætning af miljøfremmede stoffer i beluftningstanke, hvor spildevandet tilføres iltholdig luft, og orga-

rensningsanlægget, kan vi bruge LAS. LAS fordeler sig omtrent ligeligt mellem den organiske fase og vandfasen i indløbet til rensningsanlægget. Den vandige del er let nedbrydelig, og der fjernes typisk mellem 95% og 100% i den aerobe del af et rensningsanlæg. Den adsorbere fraktion er derimod meget svært omsættelig.

## Nedbrydning

under anaerob behandling Anaerob behandling af primær og sekundær slam medvirker til stabilisering og afvanding af slammene, men også til fjernelse af let omsætteligt organisk stof. Analyser af anaerobt behandlet spildevandsslam viser, at det indeholder en stor mængde miljøfremmede stoffer, der ikke nedbrydes under den anaerobe behandling (Mai et al., 1999). LAS er et af de stoffer, der tilsyneladende er meget svært nedbrydeligt under anaerobe forhold.

Figur 1



Koncentrationen af LAS i CSTR tilført spildevandsslam. ● angiver LAS i metanol ekstrakt. ○ angiver LAS i vandfasen. Fra Haagensen, 2000.

nisk stof omsættes med ilt som oxidationsmiddel. Typisk ses en næsten fuldstændig fjernelse af den opløste del af de miljøfremmede stoffer, som gennemgår det aerobe rensningstrin.

Som eksempel på, hvordan nedbrydning styres af stoffets fordeling i

Vi undersøgte anaerob behandling af LAS-holdigt spildevandsslam i en CSTR-reaktor. Reaktoren blev tilført slam med 100 mg LAS/liter fra dag 20 til dag 65, hvorefter koncentrationen blev ændret til 250 mg LAS/liter (80% opløsning opnås efter ca. 23 dage). Figur 1 viser,



» Analyser af anaerobt behandlet spildevandsslam viser, at det indeholder en stor mængde miljøfremmede stoffer, der ikke nedbrydes under den anaerobe behandling. LAS er et af de stoffer, der tilsyneladende er meget svært nedbrydeligt under anaerobe forhold «

at LAS koncentrationen i vandfasen kun ændres minimalt, mens den adsorbere LAS-fraktion stiger kraftigt med tiden. I forhold til rensningsanlæggets indløb er det altså kun en lille del af den totale mængde LAS, der findes i vandfasen i den anaerobe reaktor. Og det er denne lille del, som er biotilgængelig. Det gælder for LAS (og flere andre adsorbere miljøfremmede stoffer), at omsætningsraten er afhængig af desorptionsraten, som typisk er meget langsommere end nedbrydningsraten (Bouchez et al., 1995). Langsom nedbrydning af adsorbere miljøfremmede stoffer kan således forklares ved desorptionskinetikken, under forudsætning af tilstedeværelsen af bakterier (eller konsortium af bakterier), der kan nedbryde det pågældende miljøfremmede stof.

Anaerob behandling af LAS-holdigt spildevandsslam i vores CSTR-reaktor viste, at nedbrydningen var proportional med omsætningen af organisk stof. Ved omsætning af organisk stof bliver adsorbere LAS frigivet og dermed tilgængeligt for mikroorganismer (Haagensen, 2000). Anaerob nedbrydning af biotilgængeligt LAS er blevet yderligere undersøgt i en UASB (upflow anaerobic sludge blanket) reaktor. Ved at anvende et syntetisk spildevand uden suspenderet materiale, men kun bestående af LAS og næringsstoffer, kunne 80% LAS fjernes under anaerobe forhold (Mogensen, 2001). Disse to undersøgelser af anaerob omsætning af LAS illustrerer vigtigheden af stoffets biotilgængelighed for nedbrydning - et fænomen, som ligeledes gælder for andre lipofile stoffer, f.eks. blødgørere og PAH-forbindelser (Alexander, 1998).

Den anaerobe slamstabilisering, som den foregår i dag i hovedparten af danske rensningsanlæg, fjerner på grund af manglende biotilgængelighed ikke de lipofile miljøfremmede stoffer. Med studiet af anaerob fjernelse af LAS er problemet identificeret, men vi mangler stadig at finde løsningsmodeller. Hvis de skal ligge inden for rammerne af konventionelle rensningsanlæg, kan termofil behandling, podning med specifikke mikroorganismer eller tilsætning af en-

zymer måske forbedre omsætningen af organisk stof og miljøfremmede stoffer under den anaerobe behandling. En anden mulighed er anaerob behandling af hele spildevandsfraktionen, hvorved den producerede mængde af slam reduceres, samtidig med at biotilgængeligheden øges. Det er blevet prøvet i flere lande i den tredje verden med relativt gode resultater, dog skal fjernelsen af organisk stof øges, for at et anaerobt anlæg kan konkurrere med traditionel aerob spildevandsrensning. En tredje mulighed, som gennemgås nedenfor, er at kompostere det anaerobt stabiliserede spildevandsslam for at fjerne de resterende miljøfremmede stoffer.

#### Nedbrydning ved kompostering

Som beskrevet forekommer der miljøfremmede stoffer i anaerobt udrådnet slam, som med den nuværende teknologi ikke nedbrydes i tilstrækkelig grad under den anaerobe proces. Biologisk behandling af slammet på komposteringsanlæg er en mulig metode til at fjerne sådanne organiske forureninger.

Forsøg med en komposteringsreaktor i laboratorieskala viste, at miljøfremmede stoffer, som DEHP, LAS, NPE og summen af ni forskellige PAH'er, bliver nedbrudt ved kompostering i løbet af 25 til 90 døgn. Kompostering fjer-

nede op til 99% af de oprindelige mængder af DEHP og LAS, op til 97% af den oprindelige mængde NPE og op til 74% af den oprindelige mængde af de ni undersøgte PAH'er.

Tabel 1 viser, hvor meget DEHP der blev fjernet ved kompostering af hhv. kildesorteret dagrenovation og spildevandsslam ved forskellige procestemperaturer. Nedbrydning af DEHP var hurtig og næsten fuldstændig ved kompostering af organisk dagrenovation ved alle undersøgte temperaturer. Selv ved meget høje startkoncentrationer, som i forsøget ved 35°C lå tre gange over den skærpede afskæringsværdi på 50 mg/kg tørstof, var der en stor omsætning af DEHP. Slutkoncentrationerne lå langt under afskæringsværdien på 50 mg/kg tørstof. I spildevandsslam med lavere startkoncentrationer af DEHP var der ligeledes en væsentlig nedbrydning ved alle temperaturer med et maksimum på 91% ved 65°C.

Nedbrydning af NPE ved forskellige procestemperaturer udviste et komplekst mønster. Der blev fundet en maksimal nedbrydning på 97% i spildevandsslam (35°C, 90 døgn) og på 80% i organisk dagrenovation (55°C, 90 døgn). NPE blev ikke nedbrudt ved kompostering af organisk dagrenovation ved 70°C over 34 døgn. Ved kompostering af spildevandsslam ved 65°C skete der en ak-

**Tabel 1**

Komposttype	Procestemperatur	Nedbrydning af DEHP
Kildesorteret dagrenovation	35°C	96 %
	55°C	99%
	65°C	99 %
	70°C	99 %
Spildevandsslam	35°C	70 %
	55°C	69 %
	65°C	91 %

*Nedbrydning af DEHP ved kompostering under kontrollerede laboratorieforhold*



kumulering af mellemproduktet NP. Disse resultater indikerer, at ekstremt termofile temperaturer (65-70°C) er hæmmende for NPE-nedbrydning.

Reaktorforsøgene strakte sig maksimalt over 90 døgn, og under passende betingelser var der ikke tegn på, at nedbrydningsprocesserne stoppede. Vi antager derfor, at yderligere nedbrydning af miljøfremmede stoffer sker ved forlængelse af komposteringsperioden, hvilket er tilfældet på komposteringsanlæg, hvor processen ofte varer et halvt år eller mere, inklusiv eftermodning. Det kan konkluderes, at kompostering er en velegnet metode til at nedbringe indholdet af miljøfremmede organiske

stoffer i organiske affaldsprodukter (herunder spildevandsslam), således at affaldsprodukterne kan genanvendes til jordbrugsformål.

#### Litteratur

- ❖ **Alexander, M.** (1998). Bioavailability: Aging, sequestering, and complexing. In: Biodegradation and bioremediation. Academic Press, San Diego, CA, pp. 157-176.
- ❖ **Bouchez, M., D. Blanchet, J.P. Vandecasteele** (1995). Substrate availability in phenanthrene biodegradation: transfer mechanism and influence on metabolism. Applied Microbiology and Biotechnology 43, 952-960.
- ❖ **Haagensen, F.** (2000). Anaerob omsætning af lineær alkylbenzen sulfonat (LAS) ved udrådning af spildevandsslam. Eksamensprojekt, BioCentrum-DTU, Danmarks Tekniske Universitet.
- ❖ **Mai, P., G. Jungersen, L. Elsgaard, F. P. Vinther, J. Tørslev** (1999). Nedbrydning af miljøfremmede stoffer i biogasreaktorer. Miljøprojekt nr. 500. Miljøstyrelsen.
- ❖ **Mogensen, A.S.** (2001). Anaerobic biodegradation of linear alkylbenzene sulfonate and other organic contaminants from sewage sludge. Ph.d.-afhandling, BioCentrum-DTU, Danmarks Tekniske Universitet. ■



# Nedbrydning af miljøfremmede stoffer i jord-plantesystemer og optag i planter

Af Gerda Krog Mortensen, Liv Kure, Per Ambus, Frank Laturnus og Christian Grøn

Plantevækst øger nedbrydningen af de tre miljøfremmede stoffer LAS, NP og DEHP i jorden under laboratorieforhold. Planterne optager ikke LAS, NP og DEHP, der tilføres via spildevandsslam. Men LAS blev fundet i blade fra havre dyrket i specielle markforsøg, hvor LAS blev tilsat i opløst form.

spirede planter (7 til 10 dage gamle) blev overført til skåle med 100 ml vækstmedie tilsat radioaktivt mærkede stoffer ( $C^{14}$ -mærkede) (figur 1). Radioaktiviteten optaget i plantematerialet blev målt efter 48 timer. Den såkaldte root concentration factor (RCF) blev beregnet som forholdet imellem radioaktiviteten i rødderne og i vækstmediet (tabel 1). Det skal bemærkes, at opkon-



Figur 1. Vandkulturforsøg med raps

centreringen af radioaktivitet i rødderne kan skyldes både optagelse og adsorption af miljøfremmede stoffer.

Opkoncentrering i rødderne var afhængig af stof og planteart. Nonylphenol

havde f.eks. RCF-værdier på 76, 325, 408 og 469 for henholdsvis gulerod, tomat, byg og raps. Det vil sige, at koncentrationen af nonylphenol var 76 til 469 gange højere i rødderne end i vækstmediet. Forskellig rod morfologi og -fysiologi i de fire plantearter kan være årsag til forskellene. Mange fine rodhår kan f.eks. give en større overflade, som kan adsorbere de hydrofobe stoffer. Der var således op til 10 gange større aktivitet pr. vægtenhed i de mindre rødder end i den begyndende pælerod (1 til 2 mm i diameter) hos gulerod.

De fysiske-kemiske egenskaber af stofferne er afgørende for, hvor meget der adsorberes til overflader og/eller optages i rødderne. Forsøg med rapsplanter (tabel 1) viste, at opkoncentringsfaktoren steg med stigende apolaritet af de miljøfremmede stoffer (d.v.s. med højere  $\log K_{ow}$ -værdier). Dog var DEHP en undtagelse, hvilket måske skyldes, at DEHP er meget lidt vandopløselig og dermed vanskelig at håndtere i vandkulturforsøg.

I planter som byg, raps og tomater blev der fundet radioaktivitet i de grønne dele. Dette tyder på, at de miljøfremmede stoffer blev optaget gennem rødderne, men det er dog sandsynligt, at radioaktiviteten i bladene stammer fra vandopløselige nedbrydningsprodukter, som lettere transporteres med saften rundt i planten. ▶

Når spildevandsslam spredes på markerne, indgår indholdet af miljøfremmede stoffer i et komplekst system med jord og planter. Der findes imidlertid kun begrænset viden om miljøfremmede stoffers nedbrydning i jord-plantesystemer og optag i planter. I *Centret for Bæredygtig Arealanvendelse* har vi målt planternes optagelse af miljøfremmede stoffer i tre forskellige forsøgstyper: vandkulturforsøg, pottforsøg og markforsøg. Derudover har vi undersøgt planternes betydning for nedbrydning af miljøfremmede stoffer i jorden. Forsøgene supplerer hinanden og dækker hurtige laboratorieforsøg, dyrkningsforsøg under kontrollerede forhold i væksthuse og markforsøg under realistiske forhold. Denne kombination giver et godt grundlag for at vurdere risikoen for optag af miljøfremmede stoffer i afgrødeplanter.

## Vandkulturforsøg

Kombinationer af forskellige stoffer og planter blev testet i sterile vandkulturforsøg for at undersøge, om planter kan optage de miljøfremmede stoffer, der hyppigst findes i spildevandsslam. For-

Tabel 1

Stof	Log $K_{ow}$	RCF
LAS (C12)	3.7	20
NPEO2	4.2	88
Pyren	5.2	279
Nonylphenol	5.8	469
DEHP	7.6	76

Opkoncentringsfaktorer (RCF) i rødder fra forsøg med raps.



Figur 2. Dyrkning af raps i potter tilsat slam. Væksthusforsøg.

### Potteforsøg

Sammenlignet med vandkulturforsøg er miljøfremmede stoffer sandsynligvis mindre biotilgængelige under naturlige forhold, hvor slam bringes ud på markerne. Stofferne bindes til partikler eller nedbrydes af mikroorganismer, inden planterødder kommer i kontakt med dem. For at belyse dette undersøgte vi optaget af miljøfremmede stoffer i planter, der blev dyrket i potter med jord tilsat spildevandsslam. Dyrkningsforsøgene blev udført i væksthuse under kontrollerede forhold og med velbeskrevne jordtyper fra forsøgsmarker i Jyndevad, Askov eller Lundgård.

I de første forsøg med byg blev der tilført forskellige mængder slam sva-

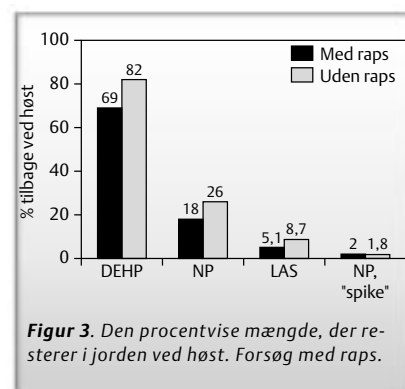
rende til 0.4 til 90 tons tørstof/ha. I et senere forsøg med raps blev der kun anvendt en enkelt slamdosering på omkring 10 tons tørstof/ha, men der blev samtidig opsat tre kontroller uden planter. Både byg og raps blev dyrket til unge planter (figur 2) og høstet efter henholdsvis 20 og 30 dage.

Indholdet af LAS og DEHP i jorden ved opsætning og høst af bygforsøget er vist i tabel 2. Selv om nedbrydningen af LAS var hurtig, var der 25% tilbage i jorden ved høst ved doseringen på 6 tons tørstof/ha. DEHP var væsentlig mindre nedbrydelig, og ved 6 tons tørstof/ha var der stadig 75% tilbage i jorden ved høst.

I forsøget med raps blev der yderligere analyseret for alkylphenoler, pri-

mært NP. Koncentrationerne af LAS, DEHP og NP i jorden ved forsøgets start og ved høst af rapsplanterne (efter 30 dage) er vist i tabel 3, og i figur 3 ses, hvor stor en del af den oprindelige mængde af stofferne, der resterer ved forsøgets afslutning. DEHP, som er væsentlig mere apolær, mindre vandopløselig og dermed mindre biotilgængelig, var mindre nedbrydelig end både NP og LAS. DEHP-indholdet i jorden ved høst var stadig 69% af koncentrationen ved forsøgets start, mens indholdet af NP og LAS var faldet til hhv. 18% og 5.1%. Ved tilsætning af NP som spike-opløsning var NP mere biotilgængelig, og kun 2% var tilbage ved høst.

Plantevækst bevirkede en hurtigere nedbrydning både af LAS, DEHP og NP. I potterne uden plantevækst resterede hhv. 8.7%, 82% og 26% af den oprinde-



Figur 3. Den procentvise mængde, der resterer i jorden ved høst. Forsøg med raps.

lige mængde LAS, DEHP og NP i jorden efter 30 dage. For potterne med plantevækst resterede kun hhv. 5.1%, 69% og 18% af den oprindelige mængde LAS, DEHP og NP. For NP tilsat i opløst form havde plantevæksten ikke den samme betydning. Dette skyldes, at stoffer tilsat i opløst form er mere biotilgængelige sammenlignet med tilførsel gennem slam.

Planterne i alle forsøg blev analyseret for LAS og DEHP. Der blev fundet lave indhold af begge stoffer i de grønne plantedele, men alle målte koncentrationer var omkring analysemetodernes detektionsgrænser på 0.5 mg/kg tørstof. Det var ikke muligt at se en sammenhæng mellem koncentrationerne af stofferne i planterne og de tilsatte mængder af slam (Grøn et al., 1999;

Tabel 2

Slamtilførsel tons TS/ha	LAS		DEHP	
	Start mg/kg TS	Høst mg/kg TS	Start mg/kg TS	Høst mg/kg TS
0	<0.2	<0.2	<0.1	<0.1
0.4	1.1	0.2	<0.1	<0.1
1.5	5.2	1.9	<0.1	<0.1
6	24	6.0	0.4	0.3
23	69	40	1.1	1.7
90	227	47	8.8	7.1

Koncentrationen af LAS og DEHP i jord tilsat spildevandsslam. Forsøg med byg.

**Tabel 3**

Stof	Start koncentration mg/kg TS	Koncentration ved høst med raps mg/kg TS	Koncentration ved høst uden raps mg/kg TS
LAS	27.5	1.4±0.1	2.4±0.3
DEHP	0.49	0.34±0.03	0.40±0.04
NP	0.246	0.032±0.010	0.064±0.016
NP, "spike"	0.450	0.009±0.002	0.008±0.002

Koncentrationen af LAS, DEHP og NP i jord tilsat anaerobt slam og med og uden rapsplanter. NP også tilført som opløsning, »spike«.

2000). De fundne indhold skyldtes derfor sandsynligvis atmosfærisk afsætning og ikke optag via rødderne.

Rapsplanterne blev også analyseret for NP, men heller ikke her var indholdet over metodens detektionsgrænse på 0.1 mg/kg tørstof. For DEHP og LAS blev der heller ikke målt indhold over stoffernes detektionsgrænser.

#### Markforsøg

I 1999 blev der etableret specielle markforsøg, hvor slam blev tilført i strenge. Slamstregene var 4 x 4 cm og blev udlagt med skiftevis 55 og 95 cm's mellemrum i 10 cm dybe riller. I alt blev tilført ca. 3 tons TS/ha. Slamstregene blev efterfølgende tildækket med jord. Noget af det benyttede slam i strengene blev spiket med LAS, således at startkoncentrationerne i jorden blev målt til henholdsvis 7 og 31 g/kg tørstof. På disse parceller blev der i 1999 dyrket havre. Delprøver af høstmoden havre blev udtaget ved at høste 1 m af de to rækker, der var omkring slamstregene. Prøverne blev vejlet og opdelt i blade, stængler og kerner og analyseret for indhold af LAS (tabel 4).

Tilførslen af 7 g LAS/kg tørstof gav en forøgelse af havrens biomasse, mens der ikke var nogen effekt af 31 g LAS/kg tørstof. Ved 7 g LAS/kg tørstof blev der ikke fundet optagelse af LAS i de enkelte plantedele, men ved 31 g LAS/kg tørstof blev der konstateret et indhold på 2.2 mg LAS/kg tørstof i bladene. Indholdet af LAS i stængel og kerner var under detektionsgrænsen på 0.5 mg/kg tørstof. Fordi slammet er udlagt i strenge og derefter dækket med jord, er der formentlig ikke tale om jordsprøjt og dermed afsætning af slampartikler på bladene. Derimod kommer rødderne

ved denne udlægningsteknik til at gå igennem større slamklumper end i hovedparten af pottforsøgene, hvor slammet var homogent fordelt i jorden. Markforsøgene kan dermed have givet en større eksponering af rødderne til slammets LAS, end tilfældet var for pottforsøgene. Det skal dog bemærkes, at der også er gennemført pottforsøg med dyrkning af byg i jord med slamklumper, uden at LAS kunne findes i grønne planter. Men i disse forsøg var der ikke tilsat ekstra LAS i opløst form (Mortensen et al., 2001).

#### Konklusion

- ❖ Vandkulturforsøg med radioaktivt mærkede stoffer viste, at de miljøfremmede stoffer hurtigt blev adsorberet til eller blev optaget i planternes rødder. Jo mere apolære stofferne var, jo større var adsorption/optag. Samtidig udviste det samme stof forskellig adsorption afhængig af plantarten.
- ❖ Dyrkningsforsøg i pletter under kontrollerede vækstforhold viste ikke optag af LAS, DEHP og NP i de grønne

dele af byg, gulerødder og raps. Plantevæksten medførte imidlertid en hurtigere nedbrydning af stofferne i jorden. LAS blev nedbrudt hurtigst, mens DEHP blev nedbrudt langsomt.

- ❖ I specielle markforsøg med slam udlagt i strenge, hvor der samtidig var tilsat LAS i opløst form, blev LAS optaget i havreblade, men ikke i stængel og kerne.
- ❖ Samlet tyder undersøgelserne på, at en række planter er i stand til at optage miljøfremmede stoffer, der findes i spildevandsslam, men at det ikke sker i måleligt omfang under realistiske forhold.

#### Litteratur

- ❖ **Grøn, C., D. Rasmussen, L. Samsøe-Petersen, G.K. Mortensen, F. Laturus, P. Ambus, E.S. Jensen, K. Vejrup, and A. Pløger** (1999). Planteoptag af miljøfremmede, organiske stoffer fra slam. Miljøprojekt nr. 477. Miljøstyrelsen.
- ❖ **Grøn, C., F. Laturus, G.K. Mortensen, H. Egsgaard, S. Bennetzen, P. Ambus, and E.S. Jensen** (2000). Plant uptake and degradation of organic contaminants in sludge amended soil. In: Lipnick, R., D. Muir, J. Hermens (eds). Persistent Bioaccumulative Toxic Chemicals: Fate and Exposure. ASC Press, pp. 99-111.
- ❖ **Mortensen, G.K., H. Egsgaard, P. Ambus, E.S. Jensen, and C. Grøn** (2001). Influence of plant growth on degradation of LAS in sludge amended soil. J. Environ. Qual. 30 (4), 1266-1270. ■

**Tabel 4**

	Biomasse gram	Blade mg/kg	Stængel mg/kg	Kerne mg/kg
Kontrol	392±65	i.a.	i.a.	i.a.
"10 LAS"	478±51	< 0.5	< 0.5	< 0.5
"50 LAS"	388±58	2.2±0.3	< 0.5	< 0.5

Biomasse samt LAS-indhold i havre dyrket på parceller med slam udlagt i strenge. i.a.: ikke analyseret.

# Nedbrydning af miljøfremmede organiske stoffer i slamgødsket markjord

Af Kaj Henriksen, Martin Hesselsøe, Torben Madsen, Hubert de Jonge og Lis de Jonge

Mikroorganismer i slam nedbryder miljøfremmede stoffer. Når slammet er klumpvis fordelt i jorden, sker nedbrydningen af LAS, NP og DEHP inde i klumperne. Stofferne trænger ikke ud i jorden. Plantevækst i slamklumperne øger ikke nedbrydningen. Tildeling af slam efter gældende grænseværdier medfører ikke en ophobning af miljøfremmede stoffer i jorden.

Nr 49  
SIDE 12

**N**edbrydelighed af miljøfremmede stoffer  
Spildevandsslam har et stort potentiale for mikrobiel nedbrydning af miljøfremmede stoffer. Dette gælder både for aerobt behandlet aktivt slam og anaerobt behandlet slam. Forsøg viser, at nedbrydningen af fremmedstoffer går mindst lige så hurtigt, når slam blandes med sterilt sand, som når slam blandes med jord. Det betyder, at de aktive mikroorganismer kommer fra slammet og så efter opblanding med jord. Den biologiske nedbrydning af de miljøfremmede organiske stoffer er en væsentlig årsag til, at stofferne normalt ikke ophobes i marken. Det er dog vist, at stoffer som LAS, DEHP, NPE og dets nedbrydningsprodukt NP kan ophobes i marken ved tilførsler af slam, der er højere end det, de danske regler tillader.

Hvor hurtigt de miljøfremmede stoffer nedbrydes i jorden afhænger af faktorer som stoffernes biotilgængelighed, indholdet af mikroorganismer og tilste-

deværelsen af ilt. Detergenterne LAS og NP har både hydrofobe og hydrofile egenskaber. De er opløselige i vand og dermed umiddelbart tilgængelige for mikrobiel nedbrydning. Under iltede forhold nedbrydes LAS og NP relativt hurtigt med halveringstiden på 7 til 10 dage. Plastblødgøreren DEHP og PAH'erne er meget lidt vandopløselige og adsorberer kraftigt til den organiske fraktion i slam og jord. Disse stoffer er derfor mindre biotilgængelige, og halveringstiden for DEHP og pyren ligger på henholdsvis 60 dage og mere end 100 dage.

Stofferne LAS, NP, DEHP og PAH'er er meget langsomt eller ikke nedbrydelige under iltfrit forhold i slam og blandinger af slam og jord. Ved lagring af afvandet slam trænger ilten kun få millimeter ned i slammet, og nedbrydningen af de miljøfremmede stoffer er derfor meget begrænset.

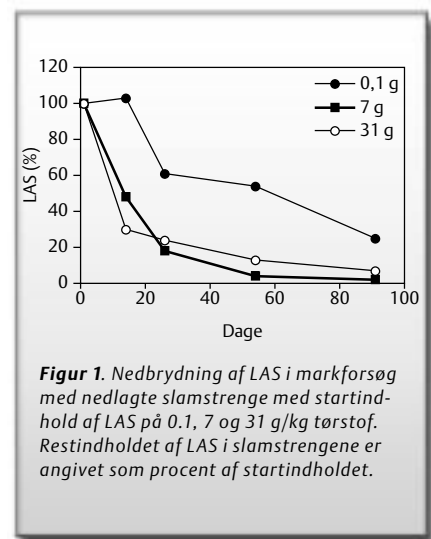
Jordens temperatur er en anden faktor, der styrer, hvor hurtigt miljøfremmede stoffer nedbrydes. Især ved temperaturer under 10°C. Forsøg med DEHP i homogene blandinger af slam og jord viser, at nedbrydningen gik 2.4 gange langsommere, når temperaturen faldt fra 20 til 10°C. Samme reduktion i nedbrydningen (2.4 gange) blev set ved et fald i temperatur fra 10 til 5°C, dvs. ved et fald på kun fem grader.

## Klumpet

fordeling af slam i jorden  
Når slam bringes ud på marken, bliver det bredspredt og nedpløjet eller nedharvet. Slammet fordeles derved i pløjelaget som klumper af varierende størrelse - typisk på 2 til 4 cm. Klumperne er vandmættede og har et højt iltforbrug på overfladen. Dette forhindrer ilten i at trænge dybere ind i slamklumpen. En stor del af slammet holdes derfor iltfrit i længere tid, hvilket forsinker nedbrydningen af de miljøfremmede organiske stoffer. I laboratorieforsøg med slamklumper af forskellig størrelse i jord trængte ilten først kun 0.3 mm ind i slammet. Efter 50 dage var ilten nået 1.8 mm ned i slammet. Dette svarer til, at halvdelen af en slamklump på 2 cm stadig er iltfrit efter knap 2 måneder.

Nedbrydningsforsøg i marken  
Markforsøg, der skulle belyse effekten af forskellig klumpstørrelse af slam, blev udført på Lundgaard (sandjord, JB2) ved Askov i 1999. I starten af maj blev slamstrengene nedlagt i 10 cm's dybde med en afstand mellem strengene på 0.5 m. Indholdet af miljøfremmede stoffer blev bestemt gennem vækstsæsonen ved at udtage jordprøver direkte fra slamstrengen. Derved undgås fortynding fra den omgivende jord, hvilket øger sikkerheden på bestemmelsen af stofferne. Foruden kontrolslam, der havde et LAS indhold på 0.1 g/kg tørstof, blev der lavet to ekstra behandlinger, hvor slammet blev tilsat LAS til henholdsvis 7 og 31 g/kg tørstof - svarende til henholdsvis 5 og 24 gange den gældende grænseværdi. Forsøgsfeltet blev efterfølgende tilsæt med havre.

Allerede efter 3 uger var omkring 50% af slammets LAS indhold omsat ved de to højeste LAS koncentrationer (figur



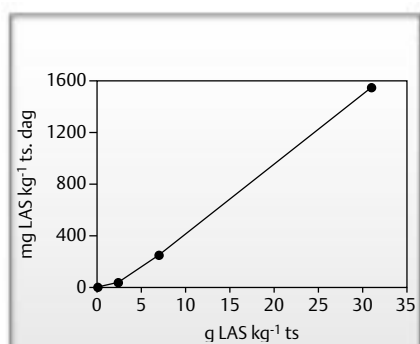
**Figur 1.** Nedbrydning af LAS i markforsøg med nedlagte slamstrengene med startindhold af LAS på 0.1, 7 og 31 g/kg tørstof. Restindholdet af LAS i slamstrengene er angivet som procent af startindholdet.

1). Og efter 3 måneder var mere end 90% omsat svarende til et restindhold af LAS på henholdsvis 0.17 og 2.2 g/kg tørstof. I det lavt belastede kontrolslam gik omsætningen af LAS først i gang efter en forsinkelse på et par uger. Efter 3 måneder var ca. 75% af LAS indholdet omsat, og restkoncentration af LAS var på 0.017 g/kg tørstof.

»Jordens temperatur er en anden faktor, der styrer, hvor hurtigt miljøfremmede stoffer nedbrydes. Især ved temperaturer under 10°C«

Tilsvarende forsøg med strenge af slam i 2000 viste, at et LAS indhold på 0.13 g/kg tørstof blev nedbrudt til 0.025-0.035 g/kg tørstof efter 2 måneder. Der var ingen yderligere reduktion i LAS-koncentrationerne efter 4 og 6 måneder. Dette tyder på, at omsætningen af LAS går meget langsomt ved de lave koncentrationer.

Sammenlignes de maksimale omsætningsrater inden for de første 4 uger, viser det sig også, at LAS i klumperne i marken omsættes langsommere, jo lavere startkoncentrationen er. Omsætningsraten er næsten lineært afhængig af LAS koncentrationen som vist i figur 2.



**Figur 2.** Maksimale omsætningsrater i marken for LAS (mg/kg tørstof/dag) ved forskellige startkoncentrationer i 4 x 4 cm slamstrenge.

Nedbrydningen af DEHP foregik meget langsommere end nedbrydningen af LAS (figur 3). I november var der stadig 25% til 40% af det oprindelige DEHP indhold på 59 mg/kg tørstof tilbage i slammet. Efter 1 år var indholdet af DEHP reduceret til 4 mg/kg tørstof - svarende til 7% af det oprindelige indhold. Der var ikke signifikant forskel på nedbrydningens forløb i slamklumper af 2 og 4 cm's størrelse (figur 3).

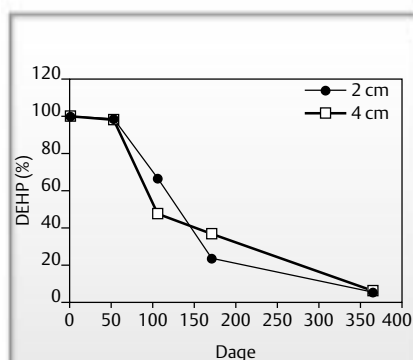
Nedbrydningen af LAS, DEHP og NP i markforsøgene med klumpet fordeling var generelt forsinket 2 til 4 uger sammenlignet med nedbrydning af stofferne i væksthuse og laboratorieforsøg, hvor slammet var homogent opblandet med jorden. Undersøgelser viste, at stofferne blev omsat inde i slamklum-

perne og ikke bevæger sig ud i den omgivende jord.

#### Effekt af planterødder

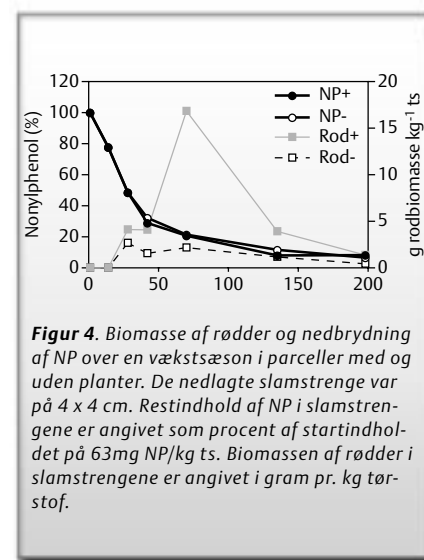
I år 2000 blev der etableret et supplerende markforsøg med slamstrenge på 4 x 4 cm. Hensigten var at undersøge, om planterødder øger indtrængning af ilt og dermed øger nedbrydningen af miljøfremmede stoffer i slamklumper i marken. Indholdet af LAS og NP blev fulgt gennem 6 måneder og opførte sig stort set ens. Efter 6 uger var omkring 70% af stofferne nedbrudt, og derefter aftog nedbrydningsraten i klumperne markant (figur 4). Der var ingen forskel på nedbrydningsraten i parceller med og uden planter. Indvoksning af rødder i slamklumperne tog først fart efter 6 uger og toppede efter godt to måneder. I markforsøgene med klumpet fordeling af slam kunne der således ikke påvises en effekt af planterødders aktivitet på nedbrydningen af LAS og NP. Det meste af omsætningen var allerede sket, før rødderne voksede ind i klumperne.

I pottforsøg i væksthuse er der derimod påvist en øget nedbrydning af LAS, NP og DEHP, når der er bygplanter i jorden (se artikel af Gerda Krog Mortensen m.fl.). Her var slammet homogent opblandet i jorden. Dette giver fuldt iltede forhold for nedbrydningen fra starten, og planterødderne har haft større mulighed for hurtig kontakt med slammet.



**Figur 3.** Nedbrydning af DEHP i markforsøg med nedlagte slamstrenge på 2 x 4 cm og 4 x 4 cm. Restindholdet af DEHP i slamstrenge er angivet som procent af startindholdet (59 mg DEHP/kg tørstof).

Den øgede nedbrydning kan derfor hænge sammen med en generel stimulering af mikroorganismene gennem udskillelse af rodexudater fra planterødderne.



**Figur 4.** Biomasse af rødder og nedbrydning af NP over en vækstsæson i parceller med og uden planter. De nedlagte slamstrenge var på 4 x 4 cm. Restindhold af NP i slamstrenge er angivet som procent af startindholdet på 63 mg NP/kg ts. Biomassen af rødder i slamstrenge er angivet i gram pr. kg tørstof.

#### Ophobning og udvaskning

I markforsøg på Lundgaard og Askov blev der gennem 3 år tilført 3 ton slam/ha/år ved bredspredning og nedharvning. Dette svarer til 3 gange den tilladte udbringningsmængde. Efter tilførsel af slam gennem de 3 år kunne der ikke konstateres en signifikant ophobning af miljøfremmede organiske stoffer i pløjelaget. Der blev målt for både LAS, NPE, DEHP og PAH.

Ved udtagningen af prøver i ovenstående forsøg var koncentrationen af slam og miljøfremmede stoffer fortyndet ud i det samlede jordvolumen - svarende til en 1000 gange fortynding af slammets tørstof. Dette påvirker den sikkerhed, der kan opnås i bestemmelsen af de undersøgte stoffer. De bedste informationer om stoffernes restkoncentrationer må derfor hentes fra forsøgene med slamklumper, der havde en maksimal tidshorisont på 1 år.

Der blev udført et begrænset antal udvaskningsforsøg med slambundet LAS og NP i intakte jordsøjler. De viste, at en klumpvis fordeling af slammet gav en mindre udvaskning, end når slammet





var fuldt opblandet i jorden. Mere end 90% af det LAS og DEHP, der blev udvasket til under pløjedybe (20 cm), var adsorberet til organiske kolloider. Den samlede udvaskning af stofferne var dog mindre end 0.5% af det totale indhold. De udførte søjleforsøg repræsenterer den værst tænkelige situation, hvor et års nettonedbør tilføres på så kort tid, at de oprindelige koncentrationer af stoffer i slammet ikke når at blive reduceret væsentligt før udvaskningen. Den udvaskning, der sker under realistiske markforhold, antages derfor at være mindre end det, der blev fundet i søjleforsøgene.

#### Konklusion

- ❖ Slam har et stort iboende potentiale for mikrobiel nedbrydning af miljøfremmede stoffer.
- ❖ Når slam er klumpvis fordelt i jorden, sker omsætningen af miljøfremmede stoffer inde i klumperne.
- ❖ Omsætningsraten af miljøfremmede stoffer er bl.a. styret af stoffernes koncentration, indtrængningen af ilt og jordens temperatur.
- ❖ Under markforhold er omsætningen af LAS, NP og DEHP forsinket 2 til 4 uger som følge af iltbegrænsning ved den klumpvise fordeling af slammet.

- ❖ DEHP var det langsomst nedbrydelige af de undersøgte stoffer. Dog blev mere end 90% af det tilførte DEHP omsat i pløjelaget i løbet af et år.
- ❖ Der var ingen stimulerende effekt af planter på nedbrydningen af LAS og NP under markforhold, hvor slammet var fordelt i klumper i rodzonen.
- ❖ Der kunne ikke konstateres en op-hobning af stofferne LAS, NP, DEHP og PAH'er i markjorden efter 3 år med tilførsel af slam svarende til 3 gange det maksimalt tilladte niveau.

#### Referencer

- ❖ **Boutrup S., L. Wiggers, P.C. Erichsen og C. A. Jensen** (1999). Miljøfremmede stoffer i sediment, vandløbsvand, fisk og jord. Rapport fra Århus Amt.
- ❖ **Gejlsbjerg, B., C. Klinge og T. Madsen** (2001). Mineralization of organic contaminants in sludge-soil mixtures. *Environmental Toxicology and Chemistry* (in press)
- ❖ **Gejlsbjerg, B.** (2001). Degradation and toxicity of organic contaminants in sludge-amended soil. Ph.d.-afhandling, Københavns Universitet.
- ❖ **Hesselsøe, M., D. Jensen, K. Skals, T. Olesen, P. Møldrup, P. Roslev,**

**G.K. Mortensen og K. Henriksen** (2001). Degradation of 4-nonylphenol in homogeneous and non-homogeneous mixtures of soil and sewage sludge. *Environmental Science and Technology*, 35, 3695-3700.

- ❖ **Madsen, L.P., J.B. Thyme, K. Henriksen, P. Møldrup, og P. Roslev** (1999). Kinetics of di-(2-ethylhexyl)phthalate mineralization in sludge amended soil. *Environ. Sci. Technol.*, vol 33, 2601-2606.
- ❖ **Marcomini, A., P.D. Capel, T. Lichtensteiger, P.H. Brunner og W.Giger** (1989). Behavior of aromatic surfactants and PCBs in sludge-treated soil and landfills. *Journal of Environmental Quality* 18, 523-28.
- ❖ **Roslev, P., L.P. Madsen, J.B. Thyme and K. Henriksen** (1998). Degradation of Phtalate and Di-(2-ethylhexyl) phtalate (DEHP) by indigenous and inoculated microorganisms in sludge-amended soil. *Applied and Environmental Microbiology*, vol 46, p.4711-4719.
- ❖ **Vikelsøe J., M. Thomsen, E. Johansen og L. Carlsen** (1999). Phtalates and Nonylphenols in soil, a field study of different soil profiles. NERI Technical report no. 268. ■

# Effekter af LAS på indholdet af smådyr i slam

Af Paul Henning Krogh

Et højt indhold af LAS i slam hæmmer væksten af smådyr. Men dyrene genetablerer deres normale antal efter, at LAS er omsat ved biologisk nedbrydning. Feltforsøg viser, at grænseværdien på 1.3 g LAS pr. gram slam kan give en akut effekt, der svarer til en nedgang i dyrenes antal på omkring 10%.

Med det væld af fremmedstoffer, som findes i slam, kan det ikke undre, at folk med kemofobi (kemikalieskræk) går i panik. Ved en godkendt tilførsel af slam på 3 ton/ha tilføres der 5 til 10 kg fremmedstoffer på en gang til landbrugsjorden. Risikoen for uønskede effekter af disse stoffer på jordens økosystem må nødvendigvis vurderes. Det gælder både for stoffer, der forekommer i lave og høje koncentrationer.

LAS er det hidtil bedst undersøgte miljøfremmede organiske stof i slam med hensyn til effekter på jordbundens organismer. LAS findes i mange typer af vaskepulver og er det miljøfremmede stof, som findes i den største mængde i slam. Rensningsanlæggene fjerner det



Foto 1. Springhale.

meste LAS fra spildevandet ved mikrobiel nedbrydning og bundfældning. Men ikke alt LAS bliver fjernet. Det betyder, at en mindre del skylles ud i naturen sammen med det rensede spildevand, og en anden større del bliver i slammet.

## Feltforsøg med LAS

Den nuværende risikovurdering og fastsatte grænseværdi for LAS i slam er baseret på laboratorieundersøgelser. I Centret for Bæredygtig Arealanvendelse har vi undersøgt, hvordan LAS rent faktisk virker under realistiske markforhold. Vi har selv tilsat LAS til slammet i høje doser - vel vidende, at disse doser ikke længere forekommer i Danmark,

» De fleste mider og springhale hæmmes i begyndelsen. Derefter vokser dyrenes antal, så de normale populationer er genetabrede efter 4 til 5 måneder«

idet den nuværende grænseværdi er på 1.3 g LAS pr. kg slam. Ideen er, at hvis den dosis vi tilfører på 10 g LAS eller endog 50 g LAS pr. kg slam ikke har nogen effekt inde i slammet, så betyder det med stor sandsynlighed, at et indhold af LAS på 1.3 g heller ikke har nogen effekt. Denne måde at vurdere på er i overensstemmelse med Miljøstyrelsens forsigtighedsprincip, hvor der stilles store krav til datagrundlaget, før man accepterer giftstoffers tilstedeværelse i miljøet. Det vil sige, at jo mindre viden man har om et stof, desto lavere koncentrationer kan man acceptere i miljøet. For feltdata gælder det, at de normalt kan opfattes som mere pålidelige end laboratoriedata. Derfor kræves der mindre sikkerhedsmarginer for feltdata end for laboratoriedata.

I forsøget er det af statistiske årsager en fordel, hvis prøverne er så ens som muligt. Derfor valgte vi at lægge slam-



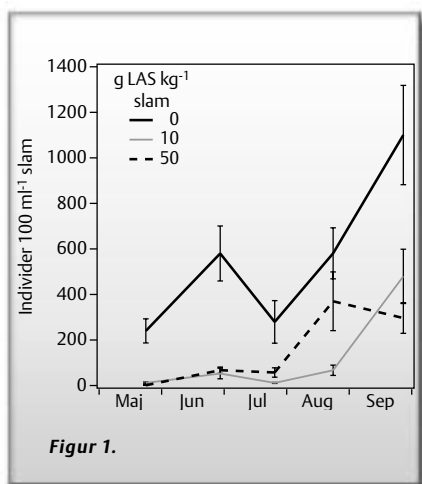
Foto 2. Springhale.

met ned i jorden som lange 4 x 4 cm tykke strenge. Dette blev gjort i maj 1999. I løbet af sommeren og efteråret fulgte vi udviklingen af jordbundsorganismer i slammet og i jorden ved siden af slammet. Vi undersøgte antallet af springhale (foto 1 og 2), mider, regnorme og enkytræer (foto 3). Disse dyr, som altid findes i en normal jord, vokser op til stort antal i næringsrig gødning og slam. Hver gang vi tog en prøve, var det altid i samme dybde, og vi vidste nøjagtigt, hvor slammet var.



Foto 3. Enkytræer.

LAS har forbigående effekt. Som det kan ses på figur 1 side 16, ender der med at være ca. 1000 enkytræorme i 100 g slam, som i starten ikke indeholder nogen dyr. Dyrene koloniserer slammet fra jorden. Gennem 3 måneder er ormene kraftigt hæmmede af tilstedeværelsen af LAS. Herefter kommer der langsomt gang i væksten, uden at dyrenes antal dog når at komme op på det normale niveau inden vinteren. Året efter var slamstrenge



Figur 1.

fuldstændigt nedbrudte, og det var ikke muligt at undersøge effekten af LAS yderligere.

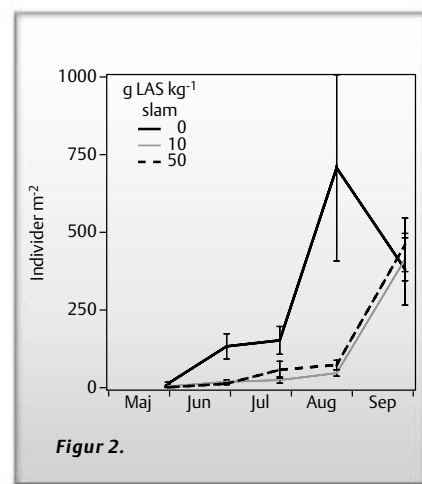
De mange andre former for hvirvelløse dyr i jorden koloniserer også slammet. De fleste mider og springhale hæmmes i begyndelsen svarende til, at en dosis på 3 til 5 g LAS pr. kg slam halverer deres antal. Derefter vokser dyre-

nes antal, så de normale populationer er genetablerede efter 4 til 5 måneder (figur 2). Arter som den lille porespringhale *Mesaphorura macrochaeta* og fløjlsmiderne klarer sig godt i slam med LAS, og deres antal kan komme op på flere gange det normale for slam uden LAS.

Ligesom LAS vil andre nedbrydelige organiske stoffer ofte hæmme dyrene i en periode, hvorefter antallet af dyr vender tilbage til det normale niveau. Dette har vi kunnet konstatere for miljøfremmede stoffer som nonylphenol, phthalater og PAH'er.

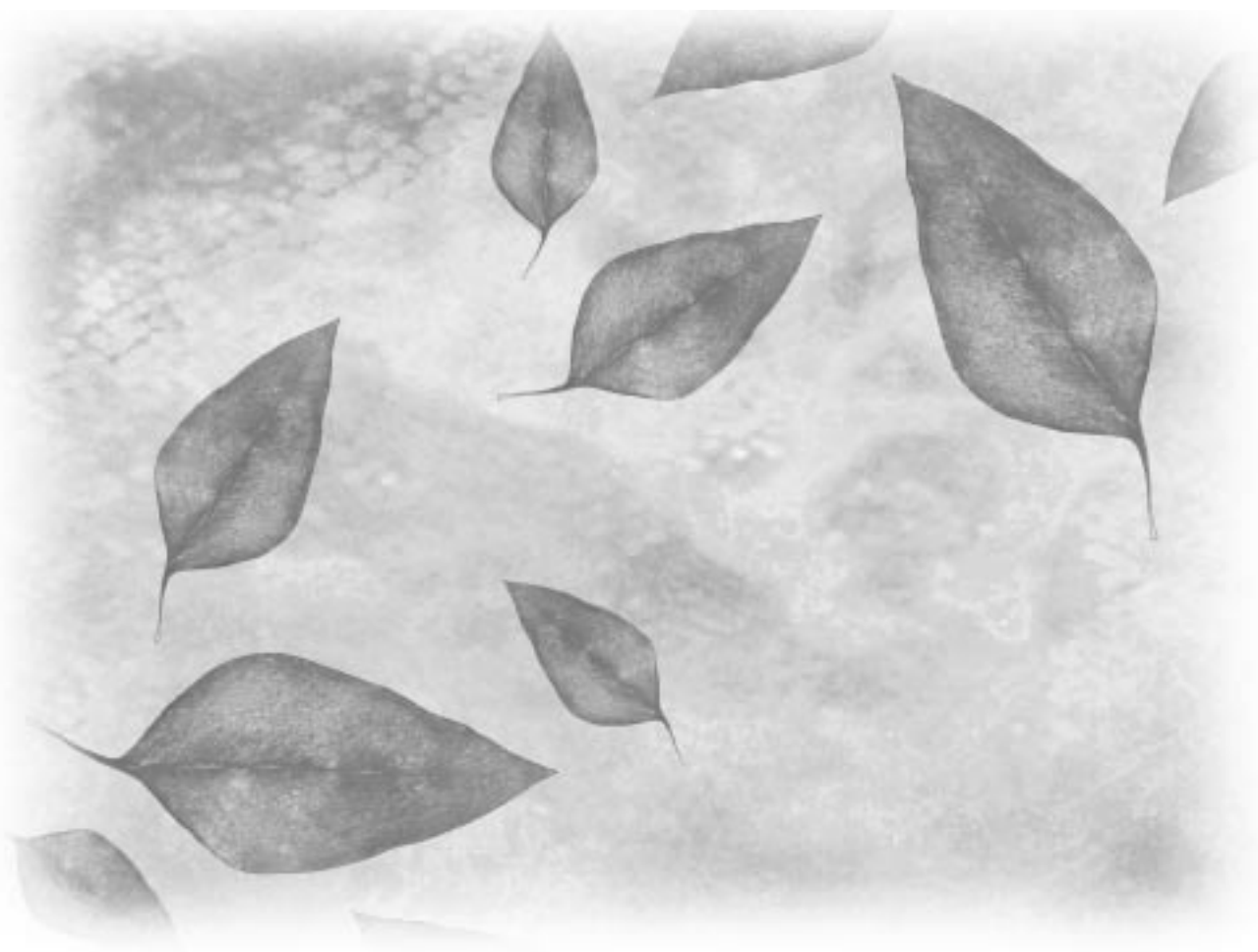
#### Risikoen ved LAS

Risikoen ved miljøfremmede stoffer vurderes til tider ud fra størrelsen af de forbigående effekter uden at inddrage muligheden for reetablering. For vores undersøgelser af LAS betyder det, at grænseværdien på 1.3 g LAS pr. kg slam



Figur 2.

er sikker nok, hvis fx en akut effekt på 50% er acceptabel. Men vil man kun acceptere en akut effekt på 10%, så er afskærvingsværdien på 1.3 g LAS pr. kg slam lige på grænsen til at give den ønskede sikkerhed for akutte effekter. Men da vi nu ved, at effekterne forsvinder få måneder senere kan et effektniveau på 10% godt accepteres. ■



# Miljøeffekter af organisk affald på dyrkningsjorden

Af Søren O. Petersen og Dorte Rasmussen

Organisk affald stimulerer jordens mikroorganismer samtidig med, at der kan være negative effekter af miljøfremmede stoffer. Individuelle grupper af mikroorganismer kan være særlig følsomme over for stofferne, men effekter på jordens funktioner er begrænsede. Modelberegninger viser, at de undersøgte organiske miljøfremmede stoffer i affaldsprodukter ikke udgør en risiko for miljøet, hvis de gældende afskæringsværdier er overholdt.

bundet med forsyningen af næringsstoffer, men også med jordens fysisk-kemiske egenskaber. Miljømæssig kvalitet sigter til ophobning og videre spredning af forureninger fra organisk affald. I den sammenhæng spiller jordens evne til at tilbageholde og nedbryde forureninger gennem biologisk aktivitet en vigtig rolle.

Jordens mikroorganismer (fortrinsvis bakterier, actinomyceter og mikrosvampe) er de primære nedbrydere af organisk stof, der fungerer som energi- og kulstofkilde for organismene. Adgangen til nedbrydeligt organisk stof begrænses som regel den biologiske aktivitet i jorden. Tilførsel af organisk affald - ofte med højt indhold af sukkerstoffer, fedt og protein - vil generelt øge den mikrobiologiske aktivitet i jorden. Eventuelle negative effekter af miljøfremmede stoffer optræder derfor parallelt med en generel stimulering. Dette er et modsætningsforhold, som vanskeliggør en detaljeret fortolkning af mikrofloras respons på tilførsel af organisk affald.

Kort- og langtidseffekter af miljøfremmede stoffer I perioden 1997-2000 er gennemført en række kontrollerede forsøg med tilførsel af organisk affald, som har til formål at belyse affaldets vekselvirkning med jordmiljøet. Effekterne af bl.a. klima og affaldets fordeling på nedbrydningsfor-

løbet er blevet belyst via undersøgelser af jordfysik (aggregatstabilitet og dispergerbart ler), jordkemi (plantetilgængeligt kvælstof og fosfor, fordeling og dynamik af kulstof- og kvælstofisotoper) og mikrobiologiske funktioner (bl.a. enzymaktiviteter, respiration, biomasse-kulstof og lipidsammensætning). De anvendte affaldsprodukter var udrådnet slam, aktivt slam og husholdningskompost.

Overordnet set havde alle typerne af affald en positiv, men forbigående effekt på jordmiljøet, herunder jordstruktur og biologisk aktivitet. Ved maksimal kontakt mellem jord og affald forsvandt effekterne typisk i løbet af 4 til 12 uger. Effekternes størrelse var ikke markant forskellige fra de udsving, der skyldes klimatiske eller dyrkningsmæssige forhold (fx sædskifte og jordbearbejdning).

Selective effekter kan dog ikke udelukkes. Separate laboratorieforsøg med stoffet LAS, der anvendes som aktivstof i vaskemidler, har vist, at specifikke populationer af mikroorganismer kan være langt mere følsomme end generelle mål for biologisk aktivitet (figur 1).

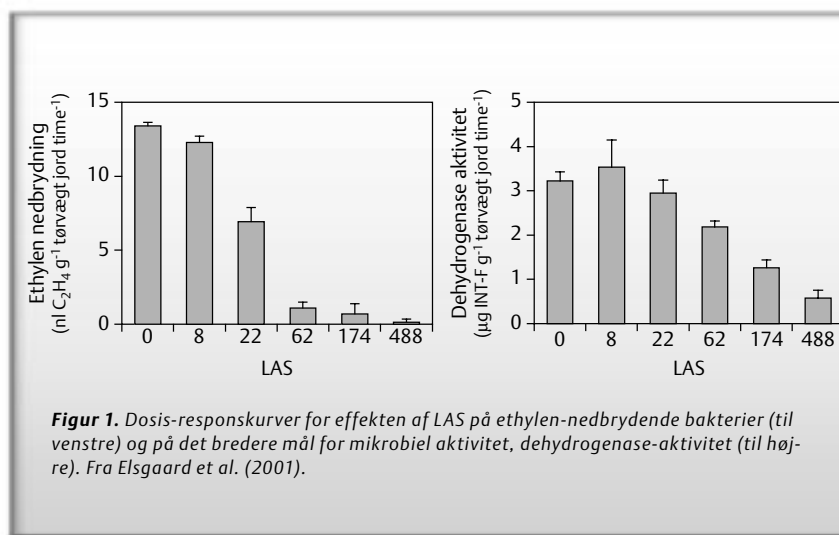
Fuld opblanding af jord og affald kan ikke opnås under praktiske forhold i marken. En mere klumpvis fordeling af affaldet begrænser effekterne på jordmiljøet som følge af den mindre kontaktflade mellem jord og affald. Om-

Genanvendelse af organiske affaldsprodukter medvirker til en mere bæredygtig landbrugsproduktion. Næringsstoffer føres tilbage til dyrkningsjorden, og tilførslen af organisk stof stimulerer en række af jordens egenskaber, som har betydning for jordens kvalitet som vækstmedium for planterne. Den medfølgende risiko for tungmetalfurening fra organiske affaldsprodukter har været erkendt i mange år. Først i de senere år er der kommet fokus på risikoen for forurening som følge af organiske miljøfremmede stoffer i affaldet.

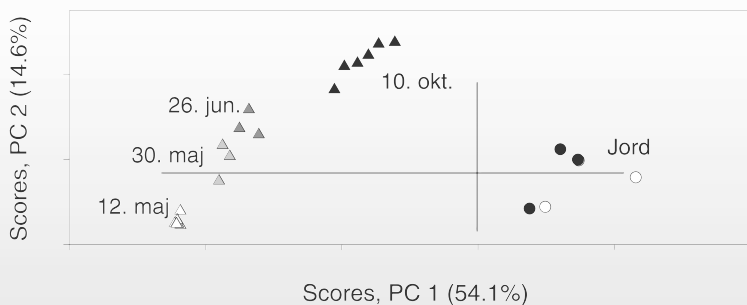
## Jordkvalitet

### og mikroorganismer

Dyrkningsjordens kvalitet vurderes bl.a. på grundlag af jordens evne til at opretholde produktivitet og miljømæssig kvalitet. Produktivitet er i høj grad for-



Figur 1. Dosis-responskurver for effekten af LAS på ethylen-nedbrydende bakterier (til venstre) og på det bredere mål for mikrobiel aktivitet, dehydrogenase-aktivitet (til højre). Fra Elsgaard et al. (2001).



**Figur 2.** I et markforsøg blev sammensætningen af det mikrobielle samfund beskrevet vha. cellemembranernes indhold af fedtsyrer. Figuren viser en principal-komponent analyse af fedtsyresammensætningen ved de fire prøveudtagninger mellem udbringning (hvide symboler) og 10. oktober (sorte symboler). Ændringerne indikerer en gradvis tilnærmelse af slammets mikroflora til den sammensætning, som findes i den omgivende jord.

Transporten af miljøfremmede stoffer ned gennem jorden er beregnet både for stoffer opløst i jordvandet og bundet til opløst organisk kulstof og kolloider. Beregningerne tyder på, at udvaskningen af stofferne er meget lav. De højeste beregnede koncentrationer i jordvandet i 1 meters dybde er mindre end 1 µg/liter for alle de undersøgte stoffer (NP, NPEO2, DCP, DEHP og pyren) med undtagelse af LAS. Beregningerne er baseret på målte, realistiske koncentrationer af de miljøfremmede stoffer i affaldsproduktet. Koncentrationen af LAS i affaldsprodukterne er ofte høj, og derfor forventes LAS at fore-

vendt betyder dette, at affaldets karakteristiske miljø bevares i en længere periode efter udbringningen. Fedtsyreprofiler (PLFA) af mikrobielle samfund har vist, at slammets mikroorganismer kun langsomt dør bort og erstattes af en mikroflora, der er mere lig jordens (figur 2). Fordelingen af affald kan således have betydning for overlevelsen af patogene organismer, såvel som for nedbrydningen af miljøfremmede stoffer i jordmiljøet.

En række af de fysiske-kemiske og mikrobiologiske egenskaber er også undersøgt under realistiske forhold efter tre års markforsøg på to jordtyper. Resultaterne herfra stemmer overens med vurderingen, at effekter af organisk affald er forbigående; dog var der over den treårige periode en betydelig ophobning af mineraliserbart kvælstof ved tilførsel af husholdningskompost. Tilsvarende var der en ophobning af plantetilgængeligt fosfor ved tilførsel af spildevandsslam.

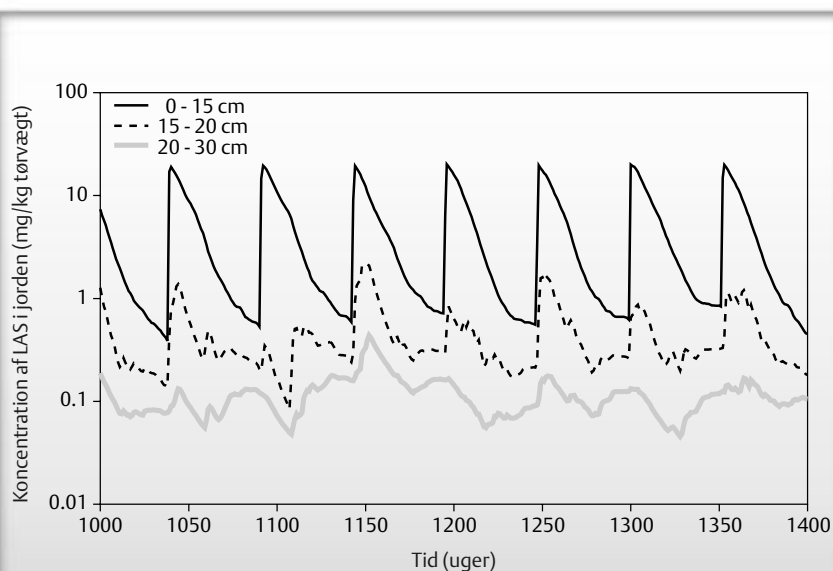
Modelberegninger af ophobning og udvaskning Jordens indhold af miljøfremmede stoffer kan stige, når organiske affaldsprodukter tilføres år efter år over en lang periode. Risikoen for en sådan ophobning er blevet vurderet ved hjælp af modelberegninger. Stoffer som LAS, NP, NPEO2 og DCP nedbrydes så hurtigt i jorden, at ophobningen er ubetydelig. Den beregnede koncentration af LAS i de øverste jordlag er vist som funktion af tiden i figur 3. Modellen antager en

årlig udbringning af slam på 2 ton/ha med et indhold af LAS på 16100 mg/kg tørstof slam. Dette indhold af LAS er meget højt, men er dog observeret.

For andre af de undersøgte stoffer, som f.eks. DEHP og pyren, sker nedbrydningen betydeligt langsommere, dvs. med halveringstider på over 100 dage. Antages en halveringstid på 300 dage, er det beregnet, at gentagne udbringninger af slam kan øge koncentrationen i det øverste jordlag med op til ca. 75% i forhold til koncentrationen umiddelbart efter den første udbringning.

» De undersøgte stoffer forventes derfor ikke at bioakkumulere i de organismer, der lever i jorden«

komme i en højere koncentration i grundvandet end mange andre stoffer. De beregnede koncentrationer af LAS i



**Figur 3.** Beregnet LAS-koncentration i den øvre del af jorden. Simulering foretaget for Langvad opland. Slamdosering: 2 ton/ha/år. LAS koncentration i slammet: 16100 mg/kg tørstof.



» Imidlertid fjernes LAS hurtigt fra det øverste jordlag, primært ved nedbrydning. En eventuel påvirkning af de organismer, der lever i det øverste jordlag, vil derfor ikke være langvarig, hvis LAS-koncentrationen i affaldsproduktet overholder den gældende afskæringsværdi «

jordvandet i 1 meters dybde vil dog normalt være under 10 µg/liter.

#### Risikovurdering

Der er udført beregninger af, hvor hurtigt stoffernes fjernes fra jorden ved biologisk nedbrydning og andre processer. Koncentrationerne af stofferne i jorden er beregnet som funktion af affaldsdosering, koncentration i affaldsproduktet og årstiden. De beregnede koncentrationer er sammenlignet med de koncentrationer, hvor der ikke forventes effekter på levende organismer (nul-effekt-koncentration).

Koncentrationen af LAS i jorden lige efter udbringning af slam kan være højere end stoffets nul-effekt-koncentration på 5 mg/kg, når koncentrationen af LAS i affaldsproduktet er højere end

1200 mg/kg tørstof. Imidlertid fjernes LAS hurtigt fra det øverste jordlag, primært ved nedbrydning. En eventuel påvirkning af de organismer, der lever i det øverste jordlag, vil derfor ikke være langvarig, hvis LAS-koncentrationen i affaldsproduktet overholder den gældende afskæringsværdi på 1300 mg/kg tørstof. For de øvrige undersøgte stoffer (NP, NPEO2, DCP, DEHP og pyren) var de beregnede koncentrationer under nul-effekt-koncentrationerne. Disse stoffer forventes ikke at udgøre en risiko for de jordlevende organismer.

De fleste af de undersøgte stoffer bindes stærkt til jorden, hvilket betyder, at organismene i jorden kun påvirkes med relativt lave koncentrationer af stofferne i jordvandet. Dette afspejles i stoffernes relativt lave toksicitet i jord-

miljøet. De undersøgte stoffer forventes derfor ikke at bioakkumulere i de organismer, der lever i jorden.

#### Litteratur

- ❖ **Elsgaard, L., S.O. Petersen, og K. Deboz** (2001). Effect and risk assessment of linear alkylbenzenesulfonate (LAS) in agricultural soil. I. Short-term effects on soil microbiology. *Environmental Toxicology and Chemistry* 20, 1656-1663.
- ❖ **Petersen, S.O., K. Deboz, og F. Larturnus** (2000). Organic wastes and soil quality. In: *Soil Stresses, Quality and Care* (Elmholt, S., Stenberg, B., Grønlund, A., Nuutinen, V., eds.). Proceedings from NJF seminar 310, Ås, April 10-12, 2000. DIAS report No. 38, pp. 123-132. ■



# Gødningsværdi af organisk affald

Af Jens Petersen

Mængden af næringsstoffer i organiske affaldsprodukter er beskeden og uden overordnet betydning for dansk landbrug. På markniveau kan affaldsprodukterne ikke dække kornets næringsstofbehov, og derfor er der altid behov for tilførsel af supplerende mineralsk kvælstof og ofte også kalium.

Nr 48  
SIDE 20

**A** Anvendelse af affaldsprodukter som næringsstofkilde i jordbruget er underlagt en række begrænsninger, både direkte og indirekte. Inden for de rammer, bekendtgørelserne på området fastsætter, er muligheden for jordbrugsmæssig anvendelse af spildevandsslam og komposteret husholdningsaffald blevet vurderet. Affaldsprodukternes værdi som ernæring for planter er vurderet både

på landsplan og på markniveau (fx Petersen, 1999).

**Næringsstofmængder på landsplan**  
Det potentielle næringsstofindhold i spildevandsslam og kildesorteret husholdningsaffald er opgjort på landsplan (tabel 1). Den potentielle mængde spildevandsslam svarer til den mængde, der årligt er blevet udbragt i 1990'erne, idet den ikke-genanvendte del (ca. 40%) heller ikke antages at blive anvendt i landbruget fremover. For kildesorteret husholdningsaffald er der tale om et beregnet indsamlingspotentiale, behæftet med usikkerhed om både tørstof- og næringsstofmængden efter kompostering, hvor specielt kvælstof kan blive tabt. Aktuelt indsamles kun ca. 10% af potentialet, og mindre end 1% af den producerede husholdningskompost anvendes i landbruget.

Ud fra beregningerne (tabel 1) kan det konkluderes, at den potentielle mængde af næringsstoffer i affaldsprodukterne ikke udgør en væsentlig kilde til næringsstofforsyningen i dansk planteproduktion, når der sammenlignes med husdyrgødning og handelsgødning.

**Næringsstofmængder på markplan**  
På markplan må der tilføres op til 210 kg N/ha/år (fra 1. august 2002: 170 kg N/

ha/år) og 30 kg P/ha/år, dog maksimalt 7 t tørstof/ha/år (Anonym, 2000a). For fosfor og tørstof gælder begrænsningen en gennemsnitlig tilførsel over henholdsvis 3 og 10 år. Da der er maskintekniske grænser for, hvor lille en mængde slam der kan tilføres ad gangen, vil den størst mulige tilførselsrate ofte blive anvendt. Dette vil samtidig minimere omkostningerne pr. ton udbragt slam. Den maksimale tilførselsrate er beregnet ud fra det gennemsnitlige næringsstofindhold i spildevandsslam og komposteret husholdningsaffald (tabel 2). For slam kan den beregnede mængde tilføres hvert 3. år, mens tilførslen af kompost kan være enten en vedvarende årlig tilførsel eller en maksimal tilførsel hvert 2. år.

Ved anvendelse af begrænsningen baseret på fosfor skal der samtidig tages højde for tilførsel af fosfor med andre organiske gødninger (Anonym, 2000a). Dette betyder fx, at der på husdyrbrug ikke er plads til yderligere tilførsel af fosfor, idet der her ofte tilføres mere end 30 ton gylle/ha med et gennemsnitlig indhold på 1 kg P/ton. Anvendelse af slam vil således primært kunne ske på planteavlsbrug. Tilførsel af kompost begrænses primært af indholdet af tørstof og total kvælstof, men ved samtidig anvendelse af husdyrgødning vil også grænsen for fosfor have betydning.

**Tabel 1**

Næringsstofkilde	Tørstof [ton]	Kvælstof [ton]	Fosfor [ton]	Kalium [ton]
Spildevandsslam (Anonym, 1999)	90.000	3.900	2.700	200
Kildesorteret husholdningsaffald (Anonym, 1998)	122.500	1.400	350	(1.200)
Husdyrgødning (Poulsen <i>et al.</i> , 2001)	(4.400.000)	197.000	49.000	151.000
Handelsgødning (Anonym, 2000c)	1.135.000	251.000	18.000	73.000

*Næringsstofmængden på landsplan i forskellige næringsstofkilder. Kildesorteret husholdningsaffald angiver det praktiske indsamlingspotentiale (ukomposteret vare), mens spildevandsslam angiver årlige mængder, der er udbragt på landbrugsjord i perioden 1997-99. Tal i parentes er anslåede værdier.*

**Tabel 2**

Affaldstype og tilførselsrate/frekvens	Tilførsel [ton tørstof/ha]	Total kvælstof [kg/ha]	Mineralsk kvælstof [kg/ha]	Fosfor [kg/ha]	Kalium [kg/ha]
Spildevandsslam, maks.	3	120	35	<b>90</b>	10
Komposteret husholdningsaffald, maks.	11	<b>210</b>	20	35	105
Komposteret husholdningsaffald, årlig	<b>7</b>	140	15	20	70

Gennemsnitlig tilførsel af tørstof, kvælstof, fosfor og kalium ved anvendelse af to affaldsprodukter. Den begrænsende parameter er anført med fed skrift.

### Gødningsvirkning

Effekten af organiske gødninger tilskrives almindeligvis kvælstof. Den biologiske rensning af spildevandet kombineret med nitrifikation-denitrifikation processen medfører imidlertid, at let plantetilgængeligt kvælstof forsvinder fra slammet, og hovedparten af det re-

» Anvendelse af slam vil således primært kunne ske på planteavlsbrug «

sterende kvælstof er bundet i svært omsættelige organiske forbindelser. I kompost er den største del af kvælstoffet ligeledes organisk bundet.

I dyrkningsforsøg udført på forsøgsmarker ved Askov og Lundgård Forsøgsstationer i 1998-2000 blev kvælstofvirkningen af handelsgødning sammenlignet med to typer spildevandsslam (aerobt og anaerobt behandlet), en type kompost baseret på husholdningsaffald og fast staldgødning fra en svinebedrift (Petersen, 2001). Gødningsværdien af handelsgødning blev sat til værdien 1.

Ved beregning udført på basis af tilført total-N ses det af tabel 3, at alle fire affaldsprodukter har en virkning mindre end 1. Især er kvælstofvirkningen af komposteret husholdningsaffald – som forventelig – meget lav. Det større estimat for aerobt slam i forhold til anaerobt slam tyder på, at en større andel af kvælstoffet i det aerobe slam er let tilgængeligt for planterne.

I organiske gødninger, der stort set ikke indeholder nitrat-kvælstof, benyttes indholdet af ammonium-kvælstof almindeligvis som udtryk for let plantetilgængeligt kvælstof. Denne tommelfingerregel passer nogenlunde for kompost og fast staldgødning, der begge har gødningsværdier nær 1 ved anvendelse af tilført ammoniumkvælstof som basis (tabel 3). Estimerne for de to slamtyper er derimod væsentlig større end 1. Dette betyder, at slammet har en kvælstofvirkning, der er større end indholdet af ammoniumkvælstof. Dette tilskrives renseprocessen, hvorunder bakterier opformerer i spildevandet. Slammet indeholder således bakterierester, hvis kvælstof forholdsvis let omsættes i jorden.

I tidligere forsøg var kvælstofvirkningen 0.2-0.3 for op til 21 ton slam-tørstof, der blev udbragt i vintermånederne (Larsen & Petersen, 1993). I den mellemliggende tid er der sket en betydelig udvikling i renseprocessen. Ligeledes blev affaldsprodukterne i de nye forsøg udbragt om foråret, og de blev omhyggeligt indarbejdet i jorden umiddelbart forud for etablering af afgrøden. Disse faktorer er med stor sandsynlighed årsagen til de høje estimater for kvælstofvirkning af spildevandsslam i de nye forsøg.

Kvælstofbehovet for vårbyg er 100 - 130 kg mineralsk N/ha afhængig af klimaområde, jordtype og forfrugt (Anonym, 2000b). Ved anvendelse af de maksimalt tilladte affaldsrater blev der ▶

**Tabel 3**

	Total-N	Ammonium-N
Anaerobt slam	0.49 0.06	1.69 0.23
Aerobt slam	0.68 0.06	1.58 0.17
Kompost	0.12 0.05	1.13 0.47
Fast staldgødning	0.55 0.06	0.87 0.08

Estimer (± spredning) for kvælstofvirkningen på tørstofudbyttet (kerne+halm) beregnet på basis af tilført total-kvælstof eller ammonium-kvælstof i organisk gødning. Kvælstofvirkningen af de organiske gødninger er beregnet relativt til kvælstofvirkningen af handelsgødning, der er sat til værdien 1 (Petersen, 2001).

for aerobt slam opnået udbytter på niveau med handelsgødning. Ved lavere tilførselsrater, eller ved anvendelse af anaerobt slam og især kompost, skal der tilføres supplerende mineralsk kvælstof for at sikre en tilfredsstillende planteproduktion.

Gødningsvirkningen af fosfor og kalium er vanskelig at konstatere i den enkelte vækstsæson, da jorden ofte har en god næringsstofstatus. Derfor må tilførsel af specielt fosfor, men også kalium, betragtes som vedligeholdelsesgødskning, idet jordens næringsstofstatus søges opretholdt. Behovet bestemmes ved et balanceprincip, hvor tilførslen modsvarer afgrødens bortførsel. Vårbyggets behov for fosfor og kalium i et kornrigt sædskifte er henholdsvis 20 og 50 kg/ha. En årlig tilførsel af komposteret husholdningsaffald vil kunne dække behovet for fosfor og kalium, mens kun behovet for fosfor kan dækkes ved tilførsel af slam (jf. tabel 2).

#### Afgrødevalg

Krav om indregning af kvælstofvirkning i gødningsregnskabet vil indirekte begrænse udbringning forud for såning af vintersæd som hvede, rug og raps (Anonym, 2000b). For slam indskrænker mulighederne sig derfor til korn, der sås om foråret, hovedsagelig vårbyg evt. med græsudlæg, hvor effektiv nedbringning kan foretages ved pløjning forud for etablering af afgrøden. Mens slam i stor udstrækning vil blive udbragt i kornrige sædskifter, er det vanskeligere at forudsige afgrødevalget ved anvendelse af kompost. Ved anvendelse af husholdningsaffald, der har gennemgået en kontrolleret kompostering, vil en kaliumkrævende og forårs-sæt afgrøde være oplagt, fx roer, kartofler, helsæd med udlæg eller, såfremt hygiejnekravene er opfyldt, en grøntsagsafgrøde.

#### Økonomisk værdi

Skal en ækvivalent mængde næringsstof købes som handelsgødning, bliver vær-



dien af slam og kompost henholdsvis 375 og 125 kr./ton tørstof. Som det fremgår af ovenstående, kan næringsstofferne i affaldsprodukterne ikke tillægges fuld værdi. Foretages beregningerne på indholdet af mineralsk kvælstof falder værdien til henholdsvis 275 og 70 kr./ton tørstof. Til sammenligning kan det nævnes, at omkostningerne ved alternativ bortskaffelse af slam er betydelige og andrager 1250-2500 kr./ton tørstof (Anonym, 1996). Dvs. »handelsværdien« ligger et sted mellem værdien af de næringsstoffer, landmanden får ind på bedriften, og samfundets omkostninger til bortskaffelse via alternative kanaler.

#### Konklusion

De totale næringsstofmængder i organiske affaldsprodukter er beskedne og uden væsentlig betydning for næringsstofforsyningen i dansk landbrug. Udbringning af spildevandsslam vil hovedsagelig ske på planteavlbrug forud for såning af vårbyg, hvor behovet for kvælstof og fosfor i en vis udstrækning vil kunne dækkes. Uanset driftsform vil der dog være behov for tilførsel af supplerende mineralsk kvælstof og, afhængig af jordens næringsstofstatus, også af kalium.

#### Litteratur

- ❖ **Anonym**, 1996. Katalog over alternative bortskaffelsesmetoder for spildevandsslam. Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 3/1996.
- ❖ **Anonym**, 1998. Notat om fordele og ulemper ved kompostering og bioforgasning som midler til at tilbageføre organisk affald til landbruget. Notat fra Miljøstyrelsen.
- ❖ **Anonym**, 1999. Spildevandsslam fra kommunale og private renseanlæg i 1997. Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 473, samt opfølgende orienteringsrapporter for 1998 og 1999 udgivet af Miljøstyrelsen i henholdsvis 2000 og 2001.
- ❖ **Anonym**, 2000a. Bekendtgørelse om anvendelse af affaldsprodukter til jordbrugsformål. Miljø- og Energiministeriets bekendtgørelse nr. 49 af 20. januar 2000 (Slambekendtgørelsen).
- ❖ **Anonym**, 2000b. Bekendtgørelse om jordbrugets anvendelse af gødning og om plantedække i planperioden 2000/2001. Plantedirektoratets bekendtgørelse nr. 660 af 4. juli 2000.
- ❖ **Anonym**, 2000c. Danmarks forbrug af handelsgødning 1999/2000. Plantedirektoratet.
- ❖ **Larsen, K.E., Petersen, J.** 1993. Langvarige mark- og lysimeterforsøg med årlig tilførsel af store mængder tungmetaltholdigt spildevandsslam. Statens Planteavlsvforsøg, SP-rapport nr. 3.
- ❖ **Petersen, J.**, 1999. Affald som næringsstofkilde. Vand & Jord 6 (2) 60-62. Præsenteret ved DAKOFA-konference i København om *Genanvendelse af organiske restprodukter i bæredygtig jordbrug*, 16. november 1998.
- ❖ **Petersen, J.**, 2001. Fertiliser value of sewage sludge, composted household waste and farmyard manure. (Under udarbejdelse).
- ❖ **Poulsen, H.D., Børsting, C.F., Rom, H.B., Sommer, S.G.**, 2001. Kvælstof, fosfor og kalium i husdyrgødning - normtal 2000. DJF-rapport, Danmarks Jordbrugsforskning (under trykning). ■

# Miljøforurening fra rester af antibiotika i organisk affald og husdyrgødning

Af Bent Halling-Sørensen<sup>1</sup>

10% til 25% af den antibiotika, der anvendes til grise, kan genfindes i gyllen. Her nedbrydes en del af stofferne, mens andre overføres til landbrugsjorden, hvor de kan gøre skade på levende organismer. Mikroalger og bakterier er meget følsomme over for antibiotika, hvorimod regnorme, krebsdyr og springhaler er nærmest ufølsomme.

Antibiotika er udviklet til at slå mikroorganismer ihjel. Derfor kan man formode, at antibiotika også vil påvirke fx mikroorganismer i miljøet, hvis stofferne er tilstede i tilstrækkeligt høje koncentrationer. Når antibiotika gives til mennesker og dyr, vil en del af stofferne udskilles i urin og afføring. Hvorvidt disse antibiotika kan udrette skade på naturen, hvis de spredes med gylle eller slam, afhænger af, hvor meget der udskilles fra mennesker eller dyr, og af stoffernes kemiske omdannelse i gylle, slam og natur. Man har længe vidst, at et stort forbrug af antibiotika kan gøre sygdomsbakterier resistente over for antibiotika, hvilket kan medføre en sundhedsmæssig risiko. Derimod kender man ikke konsekvenserne, når miljøet får tilført antibiotika.

Omsætning af næringsstoffer og organisk materiale i jorden kræver samar-

bejde mellem mange forskellige mikroorganismer. En forskydning af mikrofloraens sammensætning kan derfor påvirke jordens frugtbarhed. Vi har undersøgt om landbrugsjorden indeholder så meget antibiotika, at det udgør et problem. Om der kan ske en ophobning med tiden. Om antibiotika kan udgøre en trussel for grundvandet. Samt om antibiotika har toksiske effekter på organismer fra jord og vand.

Undersøgte antibiotika  
Figur 1 side 24 viser strukturformler for de antibiotika, der er undersøgt i dette projekt. Stoffernes struktur er forskellig, og derfor er de fysisk-kemiske egenskaber også ret varierende. Ud fra virkningen kan man groft skelne mellem antibiotika som bredspektrede (virker mod mange forskellige bakterier, svampe og lign.) eller specifikke (virker mod få grupper mikroorganismer, fx imod gramnegative eller grampositive bakterier).

Olaquinox, tylosin, oxytetracyclin og metronidazol blev udvalgt til detaljerede studier. Olaquinox og tylosin blev valgt, fordi de i 1996 var de mest anvendte vækstfremmere. Tetracyklinerne fordi de anvendes både til dyr og mennesker samtidig med, at de er bredspektrede. Metronidazol blev valgt, fordi det i mennesket omdannes til bakterielt aktive metabolitter og primært virker under anaerobe forhold. Udover disse fire antibiotika blev også tetracyclin, sulfadiazin, streptomycin, oxolinsyre, tiamulin og benzylpenicilin, valgt til studier af stoffernes effekt på bakterier, alger og krebsdyret *Daphnia magna*.

Spredning af antibiotika i miljøet

Det samlede danske forbrug af antibiotika blev i 1996 anslået til 200 tons. Heraf blev 100 tons anvendt som antimikrobielle vækstfremmere, dvs. primært som forebyggende medicin i forbindelse med svineproduktion. Ca. 60 tons blev anvendt til behandling af syge dyr i

landbruget, mens de resterende 40 tons blev anvendt til behandling af mennesker. Efterfølgende faldt forbruget en del i forbindelse med udfasningen af vækstfremmerne i år 2000. I år 2001 er forbruget steget igen, og det samlede forbrug vil formentligt være på mellem 150 og 200 tons.

Ved både forebyggende og terapeutisk behandling med antibiotika vil stofferne kunne udskilles uændret eller som nedbrydningsprodukter via fæces eller urin. I forbindelse med spredning af gylle og slam vil antibiotika derfor kunne ende på landbrugsjord. De stoffer, der anvendes til dyr, vil primært ende i gyllen, hvorimod stoffer, der anvendes til mennesker, vil ende i spildevandsslammet. I nærværende projekt er det primært den landbrugsmæssige eksponering, som er sat i fokus. Figur 2 side 25 viser, hvordan antibiotika, der anvendes til dyr, vil kunne spredes til miljøet.

Antibiotika i gylle

Forskellige antibiotika såsom tetracyclin, tylosin og lincomycin blev fundet i gylle fra gårde, som producerer svin. Typiske koncentrationer af antibiotika i gyllen var mellem 20 til 120 µg/kg gylle svarende til mellem 10% og 25% af den anvendte dosis. Indholdet af antibiotika i gyllen er afhængig bl.a. af, hvor tit dyrene behandles, hvor meget medicin de får og hvor længe gyllen opbevares i gylletanken. Behandling med foderlægemidler kræver større doser og giver som regel højere koncentration i gyllen end behandling ved injektion.

Transport og akkumulering i jord

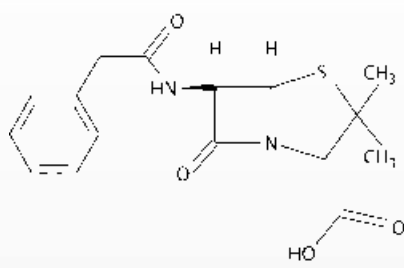
Stoffernes transport og akkumulering i forskellige jordtyper (ler- og sandjord) blev vurderet på baggrund af en række sorptions- og udvaskningsforsøg. Sorptionen blev bestemt som fordelingskoefficienten  $K_d$ , der udtrykker forholdet mellem mængden af bundet og opløst stof efter udrykning af jorden i vand. Stoffe med en svag binding til jord ken-

<sup>1</sup>Projektet er udført af Danmarks Farmaceutiske Højskole, Danmarks Tekniske Universitet, Danmarks Jordbrugsforskning og Danmarks Miljøundersøgelser i Silkeborg. Projektets resultater er publiceret i 25 videnskabelige artikler, der kan fås ved henvendelse til forfatteren.

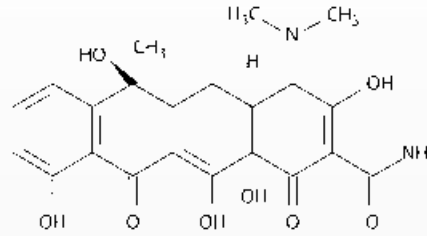


Figur 1

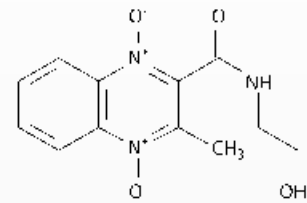
Strukturformler for undersøgte antibiotika



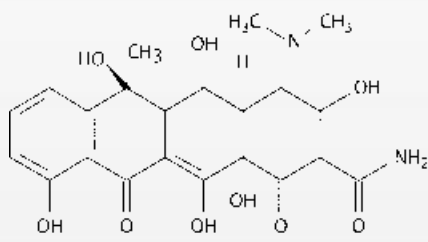
Benzylpenicillin acid (Penicillin G) (BP)



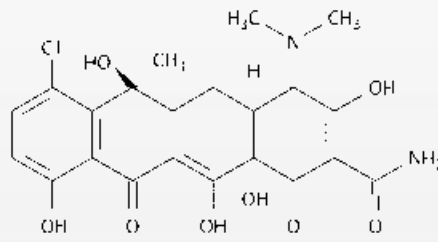
Tetracycline (TC)



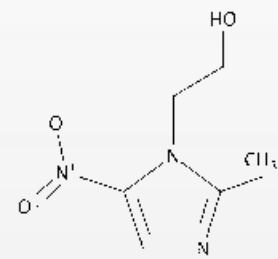
Olaquinoxid (O)



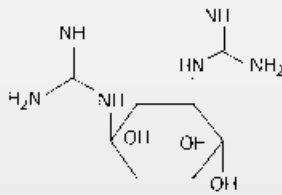
Oxytetracycline (OTC)



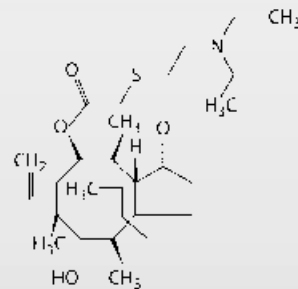
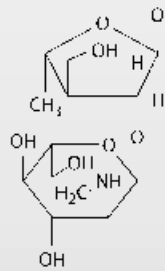
Chlorotetracycline (CTC)



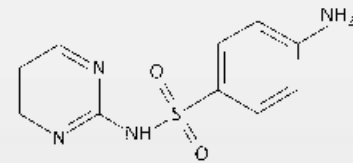
Metronidazole (MEI)



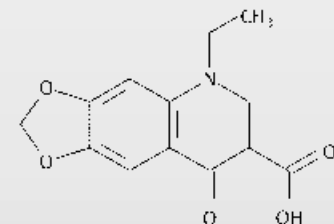
Streptomycin (S1)



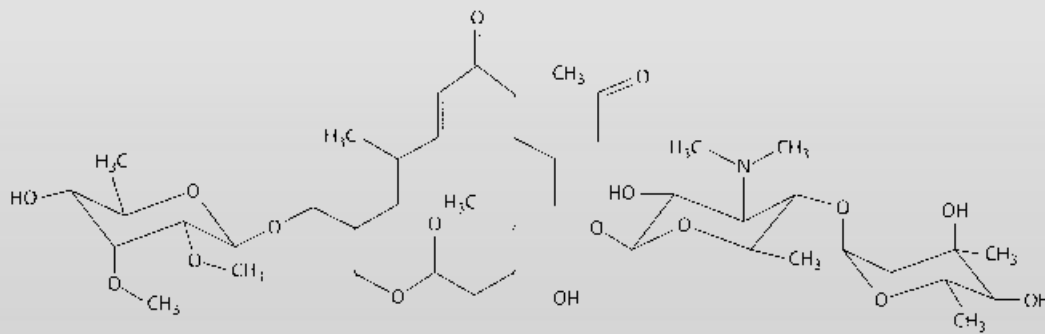
Iiamulin (II)



Sulfadiazine (SDZ)



Oxolinic acid (OXA)

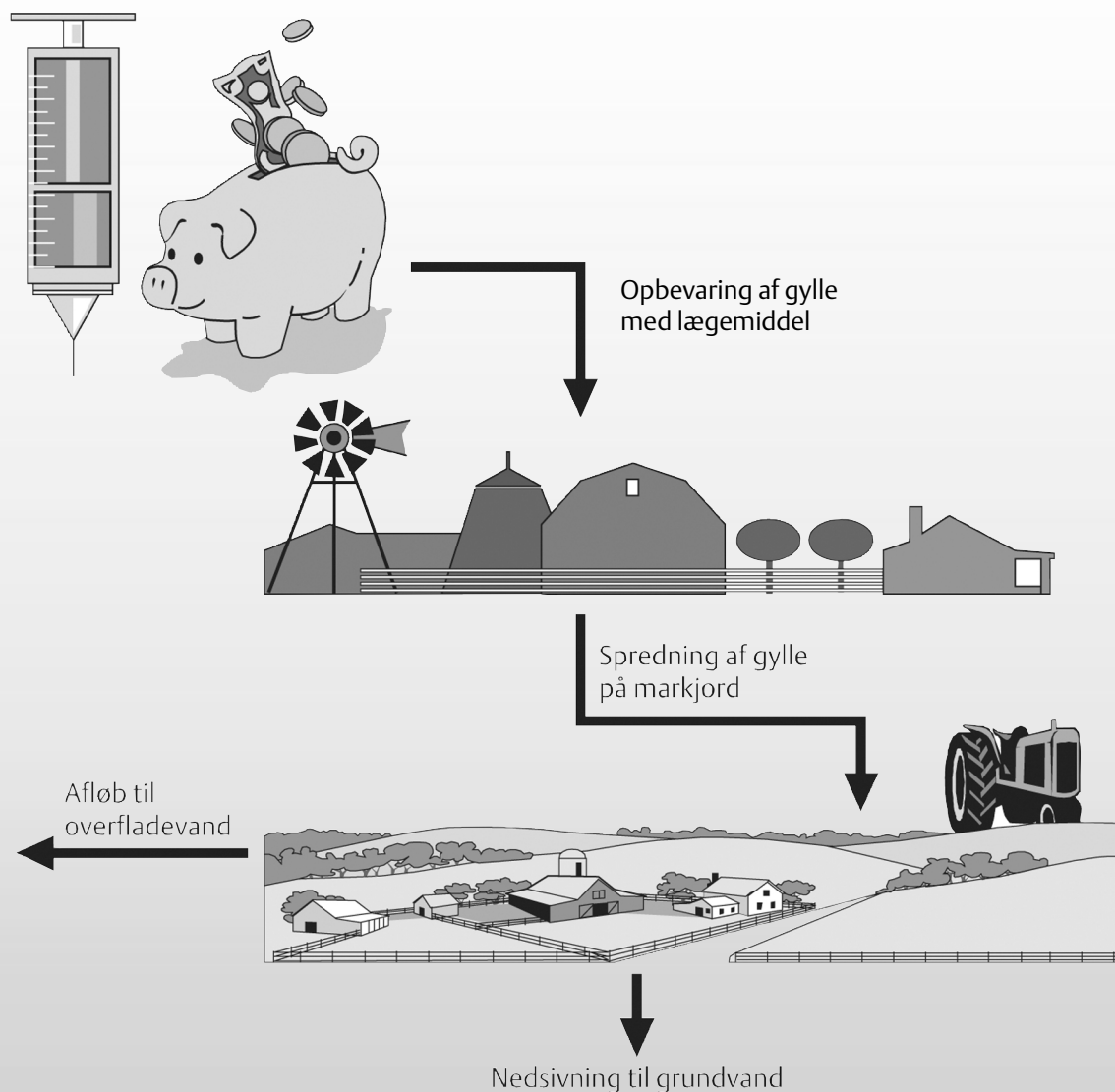


Tylosin (TYI)

»De fleste af de fundne nedbrydningsprodukter er mere mobile end moderstofferne. Derfor vil det være nærliggende at lede efter disse nedbrydningsprodukter i grundvandet«

Figur 2

## Eksponeringsscenariet for veterinært anvendte antibiotika



detegnes således ved en lav  $K_d$ -værdi. Tetracyklinerne bandt sig kraftigt til jorden og den partikulære del af gyllen. Nedbrydningsprodukter af tetracyklinerne, der blev dannet i porevandet, havde derimod en langt svagere binding til jorden og dermed større mobilitet. Olaquinox og metronidazol bandt sig kun svagt til jorden og havde samme  $K_d$ -værdier som meget mobile pesticider. Det sidste stof, der blev undersøgt, Ty-

losin, udviste moderat binding til partikulært materiale.

**Nedbrydning af antibiotika**  
Den kemiske og biologiske nedbrydning af antibiotika er undersøgt i flere testsystemer for at følge nedbrydningen under forskellige miljøforhold. I alle forsøg følges koncentrationen af teststofet som funktion af tiden ved hjælp af væsekromatografi eller massespektro-

metri. Hertil er der i projektet udviklet analysemetoder, der bl.a. kan oprense antibiotika fra matricer som jord og gylle.

Nedbrydning af antibiotika er blevet målt under forhold, der simulerer en gylletank, hvor der er metanogene forhold samt et højt indhold af organisk kulstof. Til disse forsøg anvendes et anaerobt medium med diverse uorganiske næringsstoffer, og der tilsættes et ▶

»Et overraskende resultat var, at visse nedbrydningsprodukter af tetracyclin har effekter på jordbakterier, der er resistente over for tetracyclin. Det viser, at nedbrydningsprodukterne har en anden virkningsmekanisme end moderstoffet«

antibiotikum samt gylle fra en svinefarm. Testflaskerne holdes anaerobe vha. N<sub>2</sub>-gas, og væskeprøver udtages gennem en gastæt prop. Testflaskerne inkuberes mørkt ved 20°C gennem hele forsøgsperioden, der kan strække sig over flere måneder.

Den nedbrydning, som kan foregå i jorden efter spredning af gylle, undersøges under aerobe og denitrificerende forhold, idet sådanne forhold kan forventes i pløjelaget efter nedpløjning af gylle. Der anvendes samme testsystem som beskrevet ovenfor, men testflaskerne tilsættes blot en mængde gylle, der svarer til det, der udbringes på marken. Denitrificerende forhold skabes ved tilsætning af nitrat, mens aerobe forhold sikres ved at gennemlufte testflaskerne med atmosfærisk luft under hele forsøgsperioden.

Tetracyklinerne var generelt svært nedbrydelige (halveringstid på mere end 100 dage) under alle testforhold (aerobe og anaerobe redox-forhold), hvorimod alle andre stoffer blev nedbrudt med halveringstider på mindre end 60 dage. Specielt tylosin blev nedbrudt meget hurtigt og havde en halveringstid på kun 9 dage.

Såfremt den antibiotika, som spredes på markerne, ikke nedbrydes, kan stoffer med lave K<sub>d</sub>-værdier sive ned til grundvandet eller ud i nærliggende vandløb. Nedbrydningen af antibiotika under disse forhold blev undersøgt i vand fra vandløb. Testflasker blev tilsat antibiotika og inkuberet under omrystning og ved konstant temperatur. Samme nedbrydningsmønster som set tidligere findes også under disse forhold. Da sediment kan indeholde en høj biologisk aktivitet, blev betydningen af dette undersøgt ved at tilsætte små mængder sediment til testflaskerne. Tilsætningen af sediment øgede generelt nedbrydningen af stofferne.

#### Effekter af

#### antibiotika i miljøet

Effekten af antibiotika på testorganismer fra jord og vand er blevet undersøgt. Tabel 1 giver en oversigt over nogle af de opnåede data. Typiske mål for

effekten er EC<sub>50</sub>-værdier for overlevelse, formering eller vækst.

Springhalen *Folsomia fimetaria* og enchytræen *Enchytraeus crypticus* blev anvendt til at undersøge stoffernes effekt på jordorganismer. I små beholdere med ca. 25 gram jord udsættes dyrene for forskellige koncentrationer af antibiotika i en periode på mellem 21 og 42 dage. Herefter tælles det totale antal voksne individer samt antallet af afkom i testbægeret. Ud fra disse tællinger opgøres dyrenes reproduktion og deres generelle overlevelse under de givne betingelser. Generelt er antibiotika ikke giftigt over for de anvendte organismer, men indirekte effekter kan ikke udelukkes.

Stoffernes effekt på bakterier fra et biologisk rensningsanlæg undersøges ved at pøde et vækstmedium med bakterier fra aktivt slam og følge bakteriernes vækst. Når bakterierne vokser eksponentielt, fordeles de til kolber med forskellige koncentrationer af teststoffet. Væksten i disse flasker følges og anvendes til beregning af toxiciteten. Bredspektrede antibiotika, såsom tetracyklinerne, var meget giftige over for slambakterier. Desuden var 8 forskellige nedbrydningsprodukter af tetracyclin, heriblandt nedbrydningsprodukterne  $\alpha$ -apo-OTC og  $\beta$ -apo-OTC, lige så giftige som moderstoffet ( $\mu$ g/l området). Stoffernes effekt på nitrificerende bakterier blev ligeledes undersøgt. Det var kun muligt at teste hæmningen på enkeltarter af bakterier. Stoffer med en specifik gramnegativ virkning udviste som forventet stor effekt over for bakterierne. Derimod var resultaterne for hæmningen af nitrifikation i slam svære at fortolke, da dosis-respons sammenhænge ikke kunne opnås, selv om kontrolstoffer viste, at metoden fungerede.

Effekten af stofferne metronidazol, olaquinox, tylosin og oxytetracyclin på anaerobe bakterier i gyllen er endvidere undersøgt. I metoden anvendes anaerob gylle, som overføres til testflasker med et anaerobt vækstmedium. I disse flasker vil der udvikles metangas på grund af de anaerobe processer. Udviklingen af metan følges ved at måle over-

trykket i testflaskerne. Antibiotikaens hæmning af metan produktionen estimeres ud fra forskellen i trykudvikling ved stigende koncentration af stoffet. De undersøgte stoffer var generelt ikke toksiske over for anaerobe bakterier.

Adskillige af de undersøgte antibiotika er vandopløselige og vil derfor sandsynligvis kunne transporteres til grundvand eller overfladevand. Derfor bliver effekten over for vandlevende organismer som alger og krebsdyr undersøgt. I test med alger følges hæmningen af væksthastigheden ved tilsætning af antibiotika i forskellige koncentrationer. I et syntetisk mineralmedium dyrkes krebsdyret *Daphnia magna* under nøje kontrol af lys og temperatur. Dyrene eksponeres for forskellige koncentrationer af teststofferne i 48 timer. Effekten opgøres som antallet af døde dyr ved forskellige koncentrationer af teststoffet. Det ses af tabel 1, at der i stort set alle test kræves relativt høje koncentrationer af antibiotika for at opnå effekter. Særligt krebsdyr kræver miljømæssigt høje koncentrationer af antibiotika for at give effekt. En enkelt undtagelse er oxolinsyre, hvor der er fundet EC<sub>50</sub>-værdier på 4.6 og 0.75 mg/l i test af hhv. akut toxicitet og reproduktions-evne hos dafnier. Generelt giver testene af reproduktion effektkoncentrationer, der er 10 gange lavere end for akutte test. For algen *Selenastrum capricornutum* ses der kun meget toksiske effekter for tetracyklinerne og tylosin. De samme stoffer var endog meget giftige over for blå-grønalgen *Microcystis aeruginosa* (se tabel 1).

#### Diskussion

#### og perspektivering

Anvendes organisk affald med indhold af antibiotikarester, vil de for tetracyklinerne vedkommende overføres til jorden som nedbrydningsprodukter. Specielt  $\alpha$ -apo-OTC og  $\beta$ -apo-OTC, der er nedbrydningsprodukter af oxytetracyclin, er fundet i forskellige matricer. Overførsel af de andre undersøgte antibiotika til jorden afhænger primært af, hvor længe de opholder sig i gylletanken. Ved lange opholdstider vil stoffer-

Tabel 1

Antibiotikum	Bakterier		Mikroalge		Krebsdyr
	Væksthæmning slambakterier Agarplader EC50 (mg/L)	Væksthæmning nitrificerende bakterier EC50 (mg/L)	<i>S. capricornutum</i> EC50 (mg/l)	<i>M. aeruginosa</i> (blågrønalg) EC50 (mg/L)	<i>Daphnia magna</i> Akut test EC50,48h (mg/L)
<b>-lactam antibiotics</b>					
Benzylpenicillin (penicillin G)	-	-	NOEC = 100	0.006 [0.004-0.012]	-
<b>Tetracyclines</b>					
Oxytetracycline	0.14 [0.11-0.19]	1.71 [0.55-5.23]	4.5 [2.3-8.6]	0.207 [0.175-0.246]	LOEC = 100
Chlortetracycline	0.028 [0.023-0.034]	0.64 [0.30-1.37]	3.1 [1.7-5.2]	0.05 [0.03-0.10]	-
Tetracycline	0.321 [0.263-0.392]	4.0 [3.2-4.9]	-	-	NOEC = 300
<b>Quinoxalin</b>					
Olaquinox	17.9 [11.0-29.2]	0.031 [0.009-0.067]	40 [26-58]	5.1 [4.5-5.6]	LOEC = 1000
<b>Aminoglycoside</b>					
Streptomycin	0.17 [0.15-0.20]	0.016 [0.003-0.123]	0.133 [0.034-0.357]	0.007 [0.006-0.008]	487 [346 - 721]
<b>Pleuromutilin derivative</b>					
Tiamulin	3.9 [2.3-6.5]	23.3 [16.1-33.8]	0.165 [0.079-0.285]	0.003 [0.002-0.004]	40 [36 - 43]
<b>Macrolid</b>					
Tylosin	6.1 [3.5-10.7]	NOEC = 50	1.38 [0.97-1.96]	0.034 [0.024-0.048]	680 [568 - 759]
<b>Quinolon</b>					
Oxolinic acid	0.064 [0.037-0.108]	1.0 [0.8-1.5]	16 [9.1-29]	0.18	4.6 [3.8 - 5.7]
<b>Sulfonamide</b>					
Sulfadiazin	35.4 [21.7-57.8]	17.0 [14.4-23.8]	7.8 [4.5-14]	0.135 [0.082-0.223]	221 [166 - 568]
<b>Imidazol</b>					
Metronidazol	449 [385-523]	NOEC = 100	39.1 [32.3-47.4]	-	NOEC = 100

- test ikke udført

Potensen udtrykt som  $EC_{50}$  (mg/L) værdier med tilhørende 95% konfidensintervaller for de undersøgte antibiotika på forskellige organismer.

ne nedbrydes i gylletanken. Specielt tylosin har vist sig at være rimeligt let nedbrydeligt under forskellige redox-forhold.

Projektet har vist, at der mangler viden om, hvorvidt antibiotika med en specifik gramnegativ virkning kan påvirke jordens nitrifikation på lang sigt. Det bør også undersøges, hvorvidt antibiotikarester i jorden fra organisk affald kan øge overførslen af resistens fra patogene bakterier til jordbakterier. Sådanne undersøgelser er startet i et samarbejdsprojekt imellem Statens Veterinære Serumlaboratorium og Danmarks Farmaceutiske Højskole. De fleste af de fundne nedbrydningsprodukter er mere mobile end moderstofferne. Derfor vil det være nærliggende at lede efter disse nedbrydningsprodukter i grundvandet, hvilket ikke har været muligt inden for rammerne af dette projekt.

#### Konklusion

- ❖ En række kemiske metoder er udviklet til analyse af antibiotika i matricer som vand, jord og gylle.
- ❖ Mobiliteten af fire undersøgte stoffer strækker sig fra meget mobile stoffer (metronidazole og olaquinox) til meget lidt mobile stoffer (tylosin og tetracycliner).
- ❖ Tylosin nedbrydes hurtigt, hvorimod tetracycliner er meget persistente under både aerobe og anaerobe forhold. Flere nedbrydningsprodukter af fx tetracycliner er påvist i forskellige matricer.
- ❖ Tetracycliner binder sig kraftigt til gylle og har persistente nedbrydningsprodukter i form af  $\alpha$ -apo-OTC og  $\beta$ -apo-OTC. Samme nedbrydningsprodukter er ligeledes fundet i jordvand.
- ❖ Antibiotika og nedbrydningsprodukter er meget giftige over for mikroal-

ger og til dels over for jordbakterier. Et overraskende resultat var, at visse nedbrydningsprodukter af tetracyclin har effekter på jordbakterier, der er resistente over for tetracyclin. Det viser, at nedbrydningsprodukterne har en anden virkningsmekanisme end moderstoffet.

- ❖ Test af akut toxicitet på krebsdyr viste, at antibiotika kun var meget lidt giftigt. I test af kronisk toksicitet på krebsdyr var stofferne dog langt mere giftige. Studierne blev gennemført på 8 stoffer.
- ❖ Test på regnorme og springhaler viste, at antibiotika kun havde ringe akut toxicitet på disse dyr. Indirekte effekter blev ikke undersøgt.
- ❖ Med de data, som dette projekt har givet, er der skabt mulighed for at udføre en risikovurdering for de 4 modelstoffer af antibiotika i landbrugsscenariet. ■

# Forfatteroplysninger

## Miljøforskning nr 49

### Indledning

#### Miljøfremmede stoffer fra slam – nedbrydning og effekter i marken

Lektor Kaj Henriksen  
Centerleder,  
Centret for Bæredygtig Arealanvendelse  
Afdeling for Miljøteknik, Institut 18  
Aalborg Universitet  
Tlf.: 9635 8510  
E-mail: i5kh@civil.auc.dk

### Artikel 2

#### Nedbrydning af miljøfremmede stoffer i rensningsanlæg og ved efterfølgende aerobe/anaerobe behandlingsformer

Ph.d. Anders S. Mogensen  
BioCentrum - DTU  
Danmarks Tekniske Universitet  
Tlf.: 4525 6175  
E-mail:  
anders.s.skibsted@biocentrum.dtu.dk

Ph.d. Frank Haagensen  
BioCentrum - DTU  
Danmarks Tekniske Universitet  
Tlf.: 4525 6178  
E-mail:  
frank.haagensen@biocentrum.dtu.dk

Professor Birgitte K. Ahring  
BioCentrum - DTU  
Danmarks Tekniske Universitet  
Tlf.: 4525 6183  
E-mail:  
birgitte.k.ahring@biocentrum.dtu.dk

Forsker Jacob Møller  
Afdeling for Park og Landskab  
Forskningscentret for Skov og Landskab  
Tlf.: 4517 8335  
E-mail: jam@fsl.dk

Seniorrådgiver Ulrik Reeh  
Afdeling for Park og Landskab  
Forskningscentret for Skov og Landskab  
Tlf.: 4517 8263  
E-mail: ulr@fsl.dk

Cand.scient. Pia Mai  
Tidligere Teknologisk Institut  
Nu: ROVESTA Miljø  
Tlf.: 4677 3797  
E-mail: pma@rovesta.dk

### Artikel 3

#### Nedbrydning af miljøfremmede stoffer i jord-plantesystemer og optag i planter

Seniorforsker Gerda Krog Mortensen  
Afdeling for Planteforskning  
Forskningscenter Risø  
Tlf.: 4677 4249  
E-mail: gerda.krog.mortensen@risoe.dk

Post doc Liv Kure  
Tidl. Forskningscenter Risø

Seniorforsker Per Ambus  
Afdeling for Planteforskning  
Forskningscenter Risø  
Tlf.: 4677 4152  
E-mail: per.ambus@risoe.dk

Forsker Frank Laturnus  
Tidl. Forskningscenter Risø

Afdelingsleder Christian Grøn  
Kemisk afdeling  
DHI – Institut for Vand og Miljø  
Tlf.: 4516 95 70  
E-mail: chg@dhi.dk

### Artikel 4

#### Nedbrydning af miljøfremmede organiske stoffer i slamgødsket markjord

Lektor Kaj Henriksen  
Aalborg Universitet  
Se Indledning

Ph.d. Martin Hesselsøe  
Institut for Vand, Jord og Miljøteknik  
Aalborg Universitet  
Tlf.: 9635 9936  
E-mail: i5mahe@civil.auc.dk

Afdelingsleder Torben Madsen  
Økotoxikologisk afdeling  
DHI – Institut for Vand og Miljø  
Tlf.: 45 16 93 10  
E-mail: tma@dhi.dk

Seniorforsker Hubert de Jonge  
Afdeling for Plantevækst og Jord  
Danmarks JordbrugsForskning  
Tlf.: 8999 1758  
E-mail: hubert.dejonge@agrsci.dk

Seniorforsker Lis de Jonge  
Afdeling for Plantevækst og Jord  
Danmarks JordbrugsForskning  
Tlf.: 8999 1752  
E-mail: lis.w.dejonge@agrsci.dk

### Artikel 5

#### Effekter af LAS på indholdet af smådyr i slam

Seniorforsker Paul Henning Krogh  
Afdeling for Terrestrisk økologi  
Danmarks Miljøundersøgelser  
Tlf.: 8920 1588  
E-mail: phk@dmu.dk

### Artikel 6

#### Miljøeffekter af organisk affald på dyrkningsjorden

Seniorforsker Søren O. Petersen  
Afdeling for Plantevækst og Jord  
Danmarks JordbrugsForskning  
Tlf.: 8999 1723  
E-mail: søren.o.petersen@agrsci.dk

Ph.d. Dorte Rasmussen  
DHI – Institut for Vand og Miljø  
Tlf.: 4516 9316  
E-mail: dor@dhi.dk

### Artikel 7

#### Gødningsværdi af organisk affald

Seniorforsker Jens Petersen  
Afdeling for Plantevækst og Jord  
Danmarks JordbrugsForskning  
Tlf.: 8999 1712  
E-mail: jens.petersen@agrsci.dk

### Artikel 8

#### Miljøforurening fra rester af antibiotika i organisk affald og husdyrgødning

Lektor Bent Halling-Sørensen  
Institut for Analytisk og Farmaceutisk Kemi  
Danmarks Farmaceutiske Højskole  
Tlf.: 3530 6453  
E-mail: bhs@dfh.dk ■



# Bestilling af materiale fra Det Strategiske Miljøforskningsprogram

Materialerne kan også bestilles via internettet på [www.smp.au.dk](http://www.smp.au.dk) under afsnittet »Publikationer«.

- Jeg ønsker fremover at modtage nyhedsbrevet *Miljøforskning* samt *andet materiale* udgivet af programmet (**kun kryds hvis ny abonnent**).
- Jeg ønsker at ophøre som abonnent på *Miljøforskning*.
- Jeg ønsker følgende allerede udgivet, gratis materiale tilsendt (udgåede papirversioner kan eventuelt læses på/udskrives fra Internet på adressen: <http://www.smp.au.dk>):
  - Miljøforskning nr. 9 - tema: *Jordbrugsvidenskabelig miljøforskning i Danmark-1.*
  - Miljøforskning nr. 14 - tema: *Strategisk Forskning.*
  - Miljøforskning nr. 15 - tema: *Økotoksikologisk forskning.*
  - Miljøforskning nr. 17 - tema: *Strategisk miljøforskning efter 1996 - del 1.*
  - Miljøforskning nr. 20 - tema: *Midtvejsevaluering af de første forskningscentre.*
  - Miljøforskning nr. 21 - *Miljøforskning for Fremtiden 1.* Interviews med forskere. Forskningsformidling til en bredere læserkreds (gymnasier, seminarier, o.l.)
  - Miljøforskning nr. 22 - tema: *Forskning i miljø og kræft.*
  - Miljøforskning nr. 24 - *Miljøforskning for Fremtiden 2.* Interviews med forskere. Forskningsformidling til en bredere læserkreds (gymnasier, seminarier, o.l.)
  - Miljøforskning nr. 25 - tema: *Samfundsvidenskabelig miljøforskning.*
  - Miljøforskning nr. 26 - *Præsentation af de 3 nye centre, 1996-1999.*
  - Miljøforskning nr. 28 - tema: *Kvælstofomsætning i rodzonen.*
  - Miljøforskning nr. 29 - *Miljøforskning for Fremtiden 3.* Interviews med forskere. Forskningsformidling til en bredere læserkreds (gymnasier, seminarier, o.l.)
  - Miljøforskning nr. 30 - tema: *Tab af fosfor fra landbrugsjord.*
  - Miljøforskning nr. 33 - tema: *Miljøfremmede stoffers skæbne.*
  - Miljøforskning nr. 35 - tema: *Ulandsforskning: SEREIN, SASA og DIVA* (engelsk)
  - Miljøforskning nr. 36 - *Miljøforskning for Fremtiden 4.* Interviews med forskere. Forskningsformidling til en bredere læserkreds (gymnasier, seminarier, o.l.)
    - Enkelteksemplar
    - Klasesæt. Antal eksemplarer:
  - Miljøforskning nr. 37 - *Miljøforskning for Fremtiden 5.* Interviews med forskere. Forskningsformidling til en bredere læserkreds (gymnasier, seminarier, o.l.)
    - Enkelteksemplar
    - Klasesæt. Antal eksemplarer:
  - Miljøforskning nr. 38 - tema: *Forskning i miljø- og sundhedsfarlige stoffer.*
  - Miljøforskning nr. 39 - tema: *Den Gode Jord. Forskning i økologi.* FØJO.
  - Miljøforskning nr. 40 - tema: *Hormonlignende stoffers effekter.*
  - Miljøforskning nr. 42 - tema: *Pesticider og grundvand.* Grundvandsgruppen.
  - Miljøforskning nr. 43 - tema: *Bioteknologi i Landbruget.*
  - Miljøforskning nr. 44 - *Miljø- og transportforskning* - præsentation af nyt center.
  - Miljøforskning nr. 45 - tema: *Stok eller Gulerod? Virkemidler i Miljøpolitikken. Del 1.*
  - Miljøforskning nr. 46 - tema: *Stok eller Gulerod? Virkemidler i Miljøpolitikken. Del 2.*
  - Miljøforskning nr. 47 - tema: *Den Strategiske Miljøforskning i Vadestedet.* Konferenceindlæg.
  - Miljøforskning nr. 48 - tema: *Miljøforskning for Fremtiden 6:* Forskning i økologisk jordbrug. Interviews med forskere. Forskningsformidling til en bredere læserkreds (gymnasier, seminarier, o.l.)
    - Enkelteksemplar
    - Klasesæt. Antal eksemplarer:
  - Miljøforskning nr. 49 - tema: *Slam på marken: risiko eller ressource?*
  - Præsentationsmappe* med beskrivelser af programmets centre:
    - Dansk
    - Engelsk
  - Mid-term evaluation.* Evaluering af programmets centre. Maj 1995.
  - Brochure: Nyttedyr, Skadedyr og Biodiversitet.* Folkeskoleundervisningsmateriale, 2000.
  - Hæfte: *Miljøfarlige Stoffer.* Dansk Center for Økotoksikologisk Forskning, 1997.
  - Hæfte: *Vor fælles luft - En truet ressource.* Center for Luftforureningsprocesser og Modeller, 1998.
  - Pjece om *forskningsresultater m. m. under Det Humane Delprogram, 1997.*

Stilling / Navn

---

Institution / Firma

---

Adresse

---

Tlf

Fax

E-post

Sendes til Det Strategiske Miljøforskningsprogram,  
Forskerparken, Gustav Wieds Vej 10 C, 8000 Århus C.  
Tlf.: 86 20 50 83 \* Fax: 86 13 59 10 \* E-post: [smp@smp.au.dk](mailto:smp@smp.au.dk)



[www.smp.au.dk](http://www.smp.au.dk)







SMP udgiver ny bog

## Bæredygtighed, økonomi og velfærd

af Peder Andersen, Jørgen Birk Mortensen og Helle Ørsted Nielsen (red.)



**B**landt politikere, embedsmænd og forskere, men også i den brede offentlighed, er der stor interesse for at finde veje til en bæredygtig udvikling. I juni 2001 offentliggjorde regeringen således *Danmarks nationale strategi for bæredygtig udvikling. Udvikling med omtanke – fælles ansvar*. Men hvordan er det med enigheden om indholdet? Hvordan kan bæredygtighed måles, når der tages hensyn både til vores almindelige forbrug og til udnyttelse af naturen? Og hvordan sikres en bæredygtig udvikling?

I denne bog giver økonomisk forskning et bidrag til at afklare begrebets indhold og peger videre på veje til at opnå en bæredygtig udvikling. Bogens udgangspunkt er, at en samfundsmæssig udvikling betragtes som bæredygtig, når nutidens produktion, forbrug og opsparing ikke medfører faldende velfærd for fremtidige generationer. På baggrund heraf gennemgås forskellige overordnede indikatorer, der kan indgå i vurderingen af, om udviklingen er bæredygtig; ligeledes gennemgås miljøøkonomiske modeller, der kan anvendes i analyser af, om forskellige udviklingsscenarier er bæredygtige, og modellerne bruges til analyser af konkrete udviklingsscenarier i landbrugs-, energi- og transportsektorerne.

Bogen bygger på forskning gennemført i *Center for Analyse, Modeller Og Regnskaber (AMOR)* under *Det Strategiske Miljøforskningsprogram*.

*Bæredygtighed, økonomi og velfærd* koster 100 kr. inkl. moms og kan købes ved henvendelse til:

Det Strategiske Miljøforskningsprogram  
Gustav Wieds Vej 10, 8000 Århus C  
Tlf. 86 20 50 83. Fax 86 13 59 10  
E-post: [smp@smp.au.dk](mailto:smp@smp.au.dk)  
Internet: [www.smp.au.dk](http://www.smp.au.dk)