

Recirkulering, frugtbarhed og robusthed i jord

En rapport baseret på Københavns Universitets langvarige forsøg med recirkulering af affald og restprodukter fra by til land

Jakob Magid

BRANCHEFORENINGEN
GENANVEND BIOMASSE
affald til ressource

Rapporten er skrevet af Jakob Magid, Lektor på Institut for Plante -og Miljøvidenskab, Københavns Universitet.

Rapporten er læst og kommenteret af Seniorforsker John Jensen, Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet.

Jorden er en robust, undervurderet hjælper i den cirkulære økonomi

Når vi ser fremad, er vi nødt til at genbruge mere, forbrænde mindre, samtidig med at vi holder os indenfor sikre rammer for genanvendelse. Dette er helt enkelt vigtigt, hvis vi skal gøre os håb om at holde os indenfor, eller i nærheden af de planetære grænser for, hvor meget vi mennesker kan påvirke kloden, uden at vi risikerer at sætte klodens stabilitet over styr.

Videnskaben om jordbrugets genbrug af organisk affald indikerer, at jordbund kan være særdeles robust og nyttig for os. Faktisk leverer den allerede tjenester, som vi ikke værdsætter og kun lige er begyndt at forstå.

I udviklingen af den cirkulære økonomi står vi over for spørgsmål om, hvordan vi bedst håndterer de samfundsmæssige organiske affaldsprodukter, der uundgåeligt indeholder uønskede komponenter, såsom mikroplast, medicinrester, tungmetaller, patogener og f.eks. antibiotikaresistente mikroorganismer.

Almindelig sund fornuft tilsiger en forsigtighedstilgang, der involverer avancerede tekniske løsninger, og ofte involverer forbrænding. Men når man overvejer landbrugsjords anvendelse af husdyrgødning med højt indhold af patogener, som har fundet sted i århundreder, er der grund til at tænke sig om. Hvordan er det muligt, at menneskeheden har overlevet den enorme rutinemæssige tilførsel af husdyrgødning med et meget højt tryk af patogener på den jord, der giver os vores mad?

I en nylig undersøgelse (Magid, J Pedersen, KE Hansen, M Cedergreen, 2020), der sammenlignede risici forbundet med moderne konventionel husdyrgødning og spildevandsslam, vurderede vi de ovennævnte risikofaktorer under hensyntagen til virkningen på jordmiljøet. Vi undersøgte også de menneskelige sundhedsmæssige konsekvenser af antibiotikaresistens i jord samt overførsel af lægemiddelrester og tungmetaller gennem spiselige planter. Hovedkonklusionen af denne undersøgelse var, at risikoen forbundet med landbrugsmæssig brug af dansk spildevandsslam er sammenlignelig med risikoen for svinegylle, når EU's grænseværdier for tilsætning af Zn og Cu til svinefoder er fuldt implementeret.

Siden 2003 er der I CRUCIAL forsøget systematisk anvendt affaldsmaterialer, såsom husdyrgødning, spildevandsslam og kompost af sorteret organisk affald. De er hvert år blevet udbragt i et langvarigt forsøg på Københavns Universitets forsøgsgård. Nogle behandlinger blev anvendt i både høje og urealistisk høje mængder for at teste jordens modstandsdygtighed og dermed kunne vurdere cocktaileffekter af uønskede komponenter i affald.

På trods af at have overskredet de lovlige anvendelsesgrænser mange gange (>200 år) har vi indtil videre ikke været i stand til at identificere stressreaktioner i jorden. Vi har observeret, at tilsætning af komposteret husholdningsaffald og spildevandsslam har resulteret i flere positive effekter, såsom en stigning i jordens organiske materiale, stigninger i jordens biota på tværs af fødekæden, uden negative effekter på biodiversiteten. Vi fandt, at effekterne på mikrobiel antibiotikaresistens synes at være kortvarige, og kun små stigninger i jordens tungmetalindhold og ingen stigning i afgrødernes optagelse af tungmetaller. Alt i alt må det konkluderes at tilsætning af komposteret husholdningsaffald og spildevandsslam har fremmet jordens sundhed.

I denne rapport gås i dybden med de fund der er kommet fra KU's langvarige forsøg med genanvendelse af restprodukter (CRUCIAL), og de mere end 20 publicerede artikler samt planlagte videnskabelige arbejder, baseret på resultater fra disse fortløbende forsøg

Selvom ikke alle jordtyper kan forventes at udvise en lignende modstandsdygtighed og evne til at bearbejde uønskede komponenter, som er fundet i CRUCIAL forsøget, mener vi, at der er grund til at glæde sig over, at jorden hjælper os i meget høj grad. Vi forstår, at jordtypers relative styrke i denne henseende varierer afhængigt af mineralogi, jordens pH-værdi og indholdet af organisk stof, og vi er nødt til fremover bedre at forstå grænserne for deres evne som 'hjælpere', ikke mindst for jordtyper, der er mindre modstandsdygtige.

Indholdsfortegnelse

Jorden er en robust, undervurderet hjælper i den cirkulære økonomi 3
Begreberne Jordsundhed og Jordkvalitet 6
Bestemmelse af jordkvalitet 7
Betydningen af organisk stof for jordens biologiske kvalitet 8
Betydningen af organisk stof for jordens fysiske kvalitet 8
Betydningen af organisk stof for jordens kemiske kvalitet 8
Mekanismer bag stabilisering eller 'ældning' af uønskede stoffer 8
Non-ekstraherbare rester som et problem eller en løsning 9
Tungmetallers stabilisering i jord 9
Sammenfatning vedrørende stabilisering af uønskede stoffer i jord. 10

Kvaliteten af samfundets ressourcer i et historisk perspektiv 11
KU's langvarige forsøg med recirkulering til landbrugsjord – CRUCIAL 14
Institutionelt og internationalt samarbejde 14
Forsøgets filosofi 16
Forsøgets design 16
Forsøgets materialer 19
CRUCIAL databasen 19
Udbragte mængder af stof 19
Tidslinjer – kulstof i jord 21
Tungmetalkoncentrationer i CRUCIAL behandlinger 23

Udvalgte, væsentlige fund fra CRUCIAL 24
Jordens biologiske kvalitet 24
Bakteriesamfund 24
Fødekæderne med særlig fokus på nematoder 24
Regnorme 26
Jordens fysiske kvalitet 27
Hovedresultater 27
Konklusion 28
Jordens kemiske kvalitet 28
Mikroplast i jord 29
Undersøgelser af PFAS-udbringning og udvaskning 30
Undersøgelser af jordens organiske stof 31

Tværgående perspektiver og samfundsmæssig betydning **32**
Teknologisk udvikling af slambehandling, og konsekvenserne for recirkulering 32
Hvordan er risikoen ved at anvende urbane restprodukter sammenlignet med husdyrgødning og handelsgødning? 32
Risiko for jordmiljøet 32
Risiko for human sundhed 33
Forsigtighedsprincippet og dets udfordringer 34
Risikoen ved anvendelse af handelsgødning 34
Et scenarie baseret på PFAS reguleringen i Danmark 35
Hvad koster implementeringen af PFAS-reguleringen? 36
Overvejelser om risiko overfor bæredygtighed 37

Sammenfatning **39**
Referencer **42**
PhD projekter, specialer og rapporter **45**
Oversigt over videnskabelige publikationer med CRUCIAL som det centrale forskningsobjekt **46**

Begreberne Jordsundhed og Jordkvalitet

Jordsundhed er et 'bredt' begreb, som refererer til jordens evne til at fungere som et levende økosystem, der understøtter planter, dyr og mennesker. Sund jord giver os ren luft og vand, rigelige afgrøder og skove, produktive græsningsarealer, forskelligartet dyreliv og smukke landskaber.

Jordkvalitet er et mere snævert begreb som refererer til jordens tilstand i et afgrænset område baseret på dens kapacitet til at udføre bestemte økosystemtjenester. Det omfatter jordens evne til at opretholde biodiversitet og produktivitet, regulere vand- og stofstrømme, filtrere og holde næringsstoffer i kredsløb og derigennem understøtte planter og andre organismer.

Hvor jordsundhed fokuserer på jordens evne til at fungere som et levende økosystem, fokuserer jordkvalitet på jordens kapacitet til at udføre specifikke funktioner og tjenester.

Jordsundhed bruges ofte i sammenhæng med bæredygtigt landbrug og miljøbeskyttelse, hvor målet er at opretholde og evt. forbedre jordens langsigtede funktionalitet, mens jordkvalitet bruges til at vurdere jordens egnethed til specifikke anvendelser som landbrug, byggeri og miljøbeskyttelse.

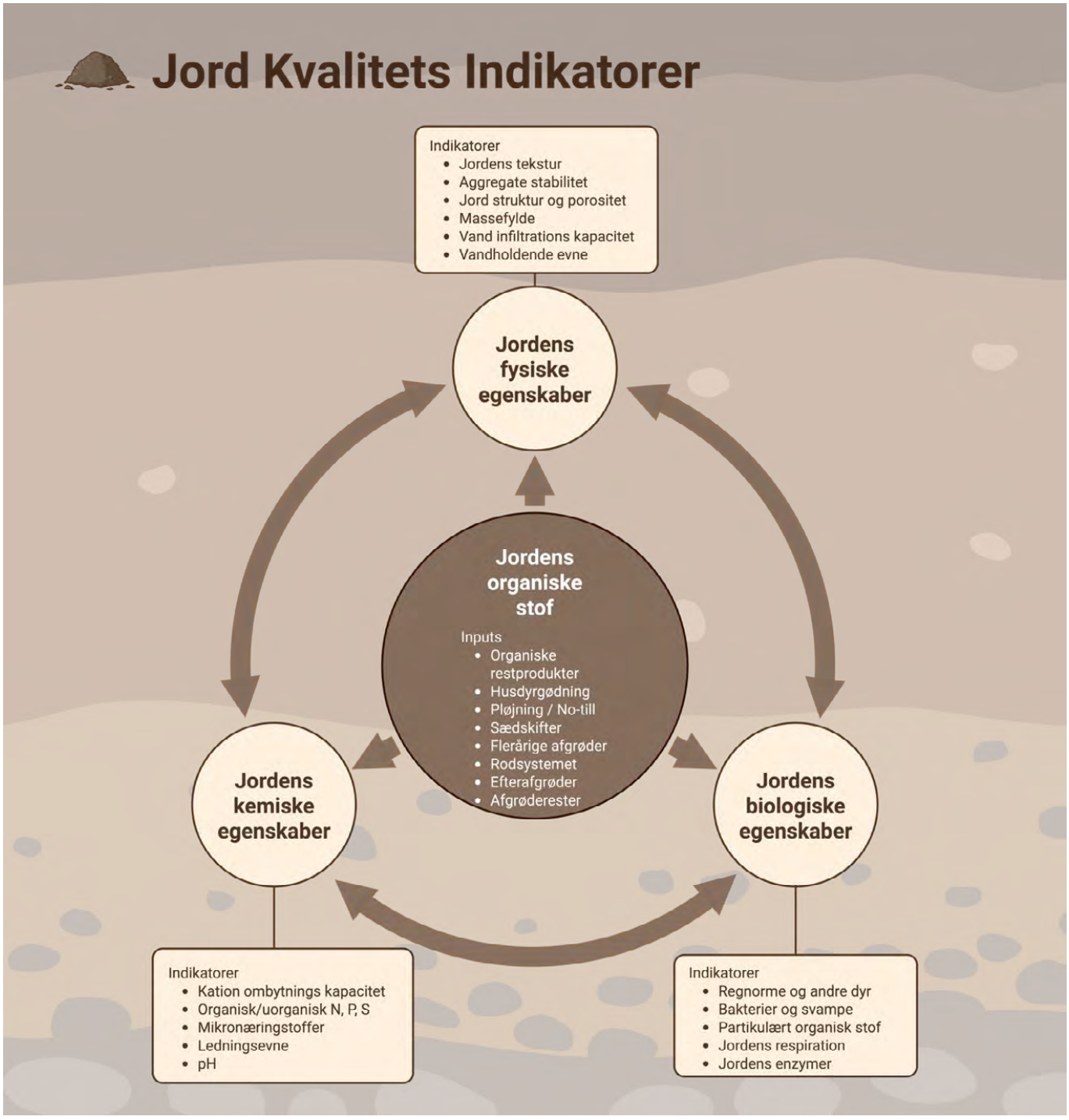
Ifølge (Bünemann et al., 2018) er jordkvalitet en komponent af miljøkvalitet, ved siden af vand- og luftkvalitet. Vand- og luftkvalitet defineres hovedsageligt af deres forureningsgrad, som direkte påvirker menneskers og dyrs forbrug og sundhed, eller naturlige økosystemer. Imidlertid er jordkvalitet ikke begrænset til graden af jordforurening, men defineres almindeligvis meget bredere som "jordens kapacitet til at fungere inden for økosystem- og arealanvendelsesgrænser for at opretholde biologisk produktivitet, bevare miljøkvalitet og fremme plante- og dyresundhed", hvor dyresundhed også omfatter menneskers sundhed.

Denne definition afspejler kompleksiteten og stedsspecificiteten af den underjordiske del af terrestriske økosystemer samt de mange forbindelser mellem jordfunktioner og jordbaserede økosystemtjenester. Derfor er jordkvalitet et mere komplekst begreb end kvaliteten af luft og vand, ikke kun fordi jord består af faste, flydende og gasformige faser, men også fordi jord bruges til langt flere formål.

Denne multifunktionalitet af jord adresseres også, når jordkvalitet defineres fra et miljømæssigt perspektiv som: jordens kapacitet til at fremme væksten af planter, beskytte vandløb ved at regulere infiltration og fordeling af nedbør, og forhindre vand- og luftforurening ved at nedregulere effekten af potentielle forurenende stoffer som landbrugskemikalier, organiske affaldsstoffer og industrielle kemikalier.

Der sker ofte en sammenblanding mellem begreberne jordsundhed og jordkvalitet fordi begge begreber omhandler jordens tilstand og funktion, og i mange henseender overlapper. Der er endda flere som mener at de betyder det samme. Else Bünemann (citeret ovenfor) er dybt involveret i EU finansieret forskning på området, og hun mener at det faktisk kan komme ud på et. I det nedenstående fokuseres der overvejende på begrebet 'jordkvalitet' som er mere præcist end jordsundhed.

Bestemmelse af jordkvalitet



Figur 1 Eksempler på jordkvalitetsindikatorer, som er møntet på jordbrugs systemer.

I figur 1, gives eksempler på jordkvalitetsindikatorer som kan anvendes til bedømmelse af jordens tilstand og evne til udførelse af specifikke funktioner. Der er meget arbejde forbundet med bestemmelse af mange af disse, hvorfor der som regel må vælges et mindre udvalg, begrænset af økonomi og hvilke hovedspørgsmål der skal adresseres. Det er ikke aktuelt at gå i dybden med hver enkelt af de nævnte indikatorer, det er et studie for sig.

Organisk stof står imidlertid helt centralt i jordkvalitetstænkningen, og groft sagt skelnes mellem 2 puljer af organisk stof: en som er relativt nedbrydeligt, og en som er ganske stabil.

Betydningen af organisk stof for jordens biologiske kvalitet

Organisk stof indeholder foruden kulstof en række organisk bundne næringsstoffer (særligt N, P og S). Selvom det meste af jordens organiske stof er temmelig stabilt, sker der alligevel en løbende omsætning af en mindre del af det. Desuden tilføres mere let omsætteligt organisk stof med voksende afgrøder, afgrøderester og organiske gødninger. Det giver energi til mikroorganismer, og resulterer i en frigivelse af næringsstoffer, som kan optages af planter.

Derfor vil en jord med et højere indhold af organisk stof normalt understøtte et rigere mikrobielt liv, og en bedre forsyning af planter med næringsstoffer. Desuden vil en høj biologisk aktivitet i jorden også forbedre fysisk jordfrugtbarhed, da mikroorganismer udskiller stoffer som binder jordpartikler sammen og dermed forbedrer jordstruktur.

Betydningen af organisk stof for jordens fysiske kvalitet

En jord med lavt indhold af organisk stof vil oftest opleves som tung og stiv (hvis der er lerindhold af betydning), mens en jord med et højere indhold, hvor det organiske stof er trængt ind i mikropore-rummet, har en bedre evne til at smuldre. Samtidigt vil den have en lavere vægtfylde (massefylde) og det vil være lettere for rødder at trænge igennem jorden. Af samme grund vil en jord med et højere indhold af organisk stof også have et bedre luftskifte og en bedre vandholdende evne – og et højere indhold af plantetilgængeligt vand. Det vil også forbedre planternes rodvækst, forbedre dyrkningssikkerheden, og muligheden for at etablere et godt såbed.

Betydningen af organisk stof for jordens kemiske kvalitet

Det stabile organiske stof kan tiltrække og fastholde kationer (positivt ladede ioner) hvis jordens pH er passende (gerne mellem 6-7.5). Hvis jorden er sur (fx pH 4-5) vil en stor del af de pladser der er på partiklerne af organisk stof være optaget af H+ ioner (brintioner). Derfor kan man sige at jordens organiske stof øger den kemiske frugtbarhed ved at øge jordens kation ombytnings kapacitet – afhængigt af jordens pH. Som det gennemgås nedenfor, kan jordens organiske stof også bidrage til at fastlægge uønskede organiske stoffer.

Mekanismer bag stabilisering eller 'ældning' af uønskede stoffer

Afhængigt af jordens mineralogi, pH og indhold af organisk stof, vil jord kunne stabilisere en lang række uønskede organiske stoffer såvel som metaller. Dette ses bl.a. gennem at det et almindeligt fænomen at observere en relativt hurtig nedbrydning af organiske stoffer umiddelbart efter forureningen efterfulgt af en efterfølgende langsom forsvinden af restfraktionen.

De vigtigste processer i ældning er diffusion til nanoporer og sorption (adsorption og absorption) til jordens organiske materiale eller andre (ladet) bindingsteder i jordmatricen. Processerne er fysisk-kemisk drevet, idet adsorption, desorption og diffusion er styret af både stof- og jordspecifikke parametre så som hydrofobicitet, vandopløselighed, pKa, kationbytterkapacitet (CEC), pH, samt jordens indhold af ler og organisk stof. Ikke kun kvantiteten, men også kvaliteten af det organiske kulstof synes at spille en vigtig rolle i kontrollen af biotilgængeligheden og dermed risikoen.

Ældningsprocessen er en stor hindring for en naturlig oprensning eller bioremediering. Men derudover kalder det også på en genovervejelse af de koncepter vi bruger til at risikovurdere jordforureninger. Forskellige risikovurderingsorganer skelner derfor typisk mellem ekstraherbare og ikke-ekstraherbare fraktioner af en stofmængde. På engelsk kaldes disse henholdsvis ekstraherbare og non-ekstraherbare rester (NER). Specielt den ikke-ekstraherbare fraktion er vigtig at forholde sig til, hvis målet er at vurdere risiko forbundet

til f.eks. udvaskning, fødekædeophobning eller biologisk optag (biotilgængelighed), idet det normalt vurderes, at NER er utilgængelig i alle disse situationer.

Non-ekstraherbare rester er kemiske stoffer eller deres nedbrydningsprodukter, der bliver i jorden, selv efter grundig ekstraktion. De dannes gennem tre hovedmekanismer:

- **Fysisk indeslutning**
  Stofferne bliver fanget i jordens mikroporer eller organiske aggregater, så de ikke kan ekstraheres.
- **Kemisk binding**
  Stofferne binder sig kovalent til jordens organiske materiale eller ler-mineraler. Disse bindinger er meget stabile og svære at bryde.
- **Biogen inkorporering**
  Mikroorganismer nedbryder stofferne og indbygger dem i deres biomasse, som senere bliver en del af jordens organiske materiale.

Faktorer som jordtype, kemisk struktur og miljøforhold påvirker, hvor meget og hvordan non-ekstraherbare rester dannes. De kan være mere eller mindre stabile, afhængigt af hvilken type der er tale om, og har betydning for, hvor længe forurenende stoffer bliver i jorden.

Dannelsen af non-ekstraherbare rester i jord udgør et paradoks inden for miljøvidenskab:

Non-ekstraherbare rester som et problem eller en løsning

Analytiske kemikere ser ofte non-ekstraherbare rester som problematiske, fordi disse rester repræsenterer kemiske stoffer, der forbliver i jorden, men som ikke kan måles eller kvantificeres med standardekstraktionsmetoder. Denne usikkerhed giver anledning til bekymring:

Ukendt risiko: Vi kender ikke den sande persistens, mobilitet eller toksicitet af disse skjulte kemikalier.

Potentiel remobilisering: Ændringer i jordforholdene (pH, mikrobiel aktivitet osv.) kan frigive NER tilbage i miljøet og muligvis forårsage fremtidig forurening.

Alternativt kan non-ekstraherbare rester ses som en naturlig dæmpningsproces:

Reduceret biotilgængelighed: Når disse kemikalier er bundet eller inkorporeret, er de stort set utilgængelige for organismer, hvilket reducerer den umiddelbare økologiske risiko.

Gradvis frigivelse: Hvis non-ekstraherbare rester langsomt remobiliseres over årtier eller århundreder, fortyndes enhver potentiel skade over tid, hvilket giver økosystemerne en chance for at tilpasse sig eller nedbryde kemikalierne yderligere.

Referencer til artikler om non-ekstraherbare rester – se også i litteratur listen:

(Harmsen et al., n.d.; Löffler et al., n.d.; Schnitzler et al., n.d.; Kästner et al., 2014; Claßen et al., 2019; Loeffler et al., 2020; Spohn et al., 2022; Hennecke et al., 2023; Jespersen et al., 2024; Lennartz et al., 2024; Boeckmann et al., 2025)

Tungmetallers stabilisering i jord

Stabilisering af tungmetaller i jord reducerer deres mobilitet, biotilgængelighed og toksicitet begrænser deres miljømæssige og sundhedsmæssige risici. Dette opnås gennem en kombination af naturlige jordprocesser og afhjælpningsstrategier.

Følgende nøglefaktorer påvirker tungmetalstabilisering i jorden:

Jordens pH
Højere pH reducerer tilgængeligheden af metaller som Cd^{2+}, Ni^{2+} og Pb^{2+}; kalkning hjælper dermed og er en meget vigtig beskyttelse i dansk sammenhæng.

Organisk materiale
Binder de fleste metaller, hvilket sænker mobiliteten.

Lerindhold
Mere ler betyder mere adsorption og stabilisering.

Kationbytningskapacitet
Jord med højere CEC holder bedre på metaller.

Redoxforhold
Påvirker, om metaller immobiliseres eller mobiliseres.

Jordforbedringsmidler
Tilsætningsstoffer som kalk, fosfater eller biokul forbedrer stabiliseringen.

Disse faktorer bestemmer tilsammen, hvor tæt tungmetaller holdes på plads i jorden, og hvor stor risiko de udgør.

Referencer til artikler om stabilisering af tungmetaller i jord – se også i litteratur listen:

(Lee et al., 2009; Smolders et al., 2009; Brokbartold et al., 2012; Smolders, 2013)

Sammenfatning vedrørende stabilisering af uønskede stoffer i jord.

Dannelsen af non-ekstraherbare rester og stabilisering af tungmetaller i jord kan ses som fænomener der i høj grad øger jordsystemets robusthed. På jorde med et vist indhold af ler (f.eks. højere end 10%), hvor pH kontrolleres gennem kalkning, og hvor der tages hensyn til opbygning og vedligeholdelse af jordens organiske stof, vil der være en meget høj grad af robusthed. Det er klart at denne vil mindskes ved lavere lerindhold, lavere pH og lavere indhold af organisk stof. Det betyder, at vores meget sandede jorde, med lavere pH, er væsentlig mindre robuste.

Kvaliteten af samfundets ressourcer i et historisk perspektiv

Rachel Carsons bog 'Silent Spring' fra 1962, affødte en stærk debat i Vesten om vigtigheden af at kere sig om miljøet, også i Danmark, som var det første land der fik et egentligt miljøministerium (i 1971). Dette har medført et stort fokus på potentielle miljøskadelige stoffer, hvilket har medført, at kvaliteten af samfundets ressourcer har ændret sig i meget betydeliggrad. Meget af den frygt, som i dag præger debatten, er baseret på ældre fund, som bliver ved med at spøge. Vi lever i helt anden verden, end den der fandtes gennem 50'erne og gennem 80'erne, også hvad angår samfundets ressourcer.

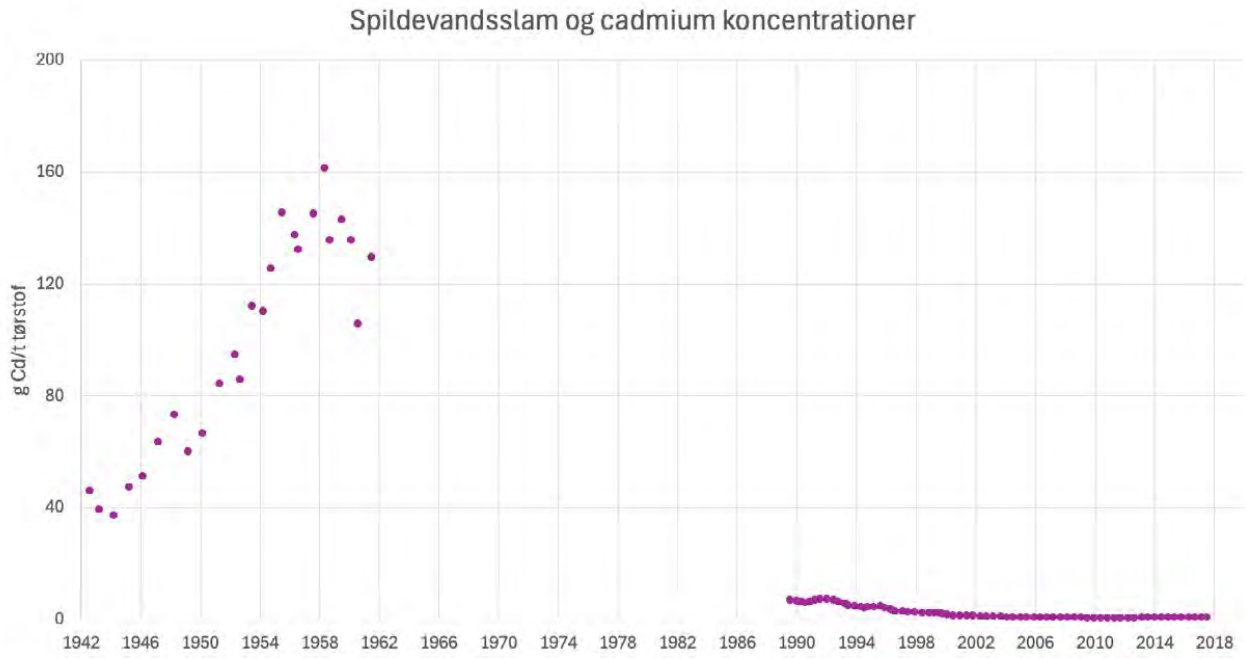
Produktion, anvendelse og kvalitet af spildevandsslam i Danmark, blev undersøgt af (Jensen and Jepsen, 2005) med fokus på udviklingen fra 1980'erne til 2002. Slammet blev udtaget fra kommunale og industrielle renseanlæg og blev anvendt bl.a. som gødning i landbruget. I 1980'erne blev der indført de første kvalitetskriterier for tungmetaller i slam. I 1997 blev der tilføjet grænseværdier for organiske forurenende stoffer som LAS, DEHP, nonylphenol og PAH'er.

Undersøgelsen viste at:

- Niveauet af tungmetaller som cadmium, kviksølv og krom er faldet markant siden 1987.
- Organiske stoffer som LAS og nonylphenol er reduceret med hhv. 40% og 65% fra 1997 til 2002.
- Forbedringer skyldes bl.a.:
  - Kildesporing og udfasning af problematiske stoffer.
  - Bedre behandling og efterbehandling.
  - Affaldsafgifter, som fremmer landbrugsanvendelse

Konklusionen på undersøgelsen var, at slamkvaliteten i Danmark er forbedret betydeligt siden 1980'erne. Kombinationen af regulering, teknologisk udvikling og økonomiske incitamenter har været afgørende for denne udvikling.

Ved at sammensætte undersøgelser af den historiske udvikling i tungmetalindholdet af slam er det muligt at komme endnu længere tilbage.



Figur 2. Den historiske udvikling af Cadmiumindholdet i spildevandsslam (tørstof basis). I den første tidsserie er slamprøverne fra arkivet på Rothamsted research station (McGrath, 1984) og stammer oprindeligt fra London sewage works. Den anden tidsserie (fra slut 80'rne og frem) er baseret på nationale statistikker.

Det ses, at der er sket en reduktion på mere end en faktor 100, fra de høje værdier i slutningen af 50'erne. Der er tilsvarende data for bly og nikkel, og mindre fald af zink og kobber. Forsøgene fra Rothamsted udgør en meget vigtig del af den viden, vi har om Cadmium i jord og planter, og har været formende for vores forståelse og fornemmelse af risiko ved brug af spildevandsslam. Forsøgene er baseret på udbringning af meget belastet slam, resulterende i høje koncentrationer af Cadmium i jorden. Det er vigtigt at forsøge at begribe, at vi i dag er i en helt anden verden med et meget lavere niveau af forurening i slammet.

Et andet forhold som er forbigået offentlighedens opmærksomhed, er at der er sket betydelige fald i emissioner af kviksølv, bly og cadmium til atmosfæren i løbet af de sidste 2 årtier. Det er på grund af regulering, som fordrer at afbrændingsgasser fra store virksomheder skal renses.

Baseret på dette, genovervejede og opdaterede (Smolders, 2013) effekten af fosforgødning på cadmiumophobning i europæiske landbrugsjord. Fremtidige langsigtede ændringer (100 år) i jordens Cadmiumkoncentrationer blev beregnet for fire Cadmiumkoncentrationer i gødning (svarende til 46, 92, 138 og 183 mg Cadmium pr. kg P) og for 2160 forskellige scenarier, der dækker de forskellige forhold, der forekommer i EU, dvs. fosforgødningsanvendelse, jordens egenskaber (pH, organisk kulstofindhold), klimatiske forhold, der påvirker udvaskning, afgrødetype og atmosfærisk deposition (fra nul til værst tænkelige); og for de europæiske gennemsnitsværdier.

Følgende konklusioner blev uddraget:

- Ved den højeste undersøgte Cadmium-koncentration, 183 mg Cadmium pr. kg P, forventes jordens Cadmium at forblive nogenlunde konstant.
- Ved 138 mg Cadmium pr. kg P forventes jordens Cadmium at ændre sig med -7 % på 100 år, dvs. et nettofald.
- Ved 92 mg Cadmium pr. kg P er disse værdier -14 %, og ved 46 mg Cadmium pr. kg P er de -20 %.

Den nuværende gennemsnitlige EU Cadmium-massebalance er således negativ sammenlignet med positive balancer estimeret i 2002.

Der er lavet en vurdering af gennemførelse og anvendelse af slamdirektivet i 2024, som viser at cadmium-koncentrationerne i dansk spildevandsslam, i gennemsnit har et indhold på 36.3 mg Cd/kg totalfosfor.

Der mangler en oversigt over, hvad der rent faktisk er af Cadmium i importerede handelsgødninger. Der er meget stor forskel på råfosfat depoter, f.eks. har depoter på Kola halvøen lavt Cadmium indhold, mens depoter fra Marokko har et væsentligt højere indhold. Bekendtgørelse om indhold af cadmium i fosforholdig gødning tillader kun import hvis det ikke indeholder mere end 48 mg cadmium (Cd) pr. kg fosforpentoxid (P_2O_5.). Omregnet til total fosfor svarer dette til ca. 110 mg Cd per kg P.

Konklusionen af det ovenstående er, at det er forventeligt, at koncentrationerne af Cadmium i danske landbrugsjord er faldende, selvom der anvendes fosforgødning med op til 100 mg pr. kg fosfor, hvilket er grænseværdien for cadmium i affald, der anvendes som gødning på landbrugsjord. Derfor er det relevant at spørge – hvor hurtigt sådanne koncentrationer bør falde, i betragtning af behovet for at genbruge begrænsede fosforressourcer, såsom spildevandsslam?

KU's langvarige forsøg med recirkulering til landbrugsjord – CRUCIAL

KU's langvarige forsøg med recirkulering til landbrugsjord (CRUCIAL), har vist os, at jord i langt større grad end vi har forestillet os kan hjælpe os med håndtering af uønskede stoffer, som fx tungmetaller, mikroplast, PFAS, medicinrester og antibiotikaresistens.

Institut for Plante og miljøvidenskab, Københavns Universitet, har i 2003 etableret et fast liggende forsøg med affaldsbiomasse, herunder: spildevandsslam, komposteret / bioforgasset husholdningsaffald og human urin. Forsøgsarealet, i daglig tale kaldet 'CRUCIAL-marken', blev oprettet med støtte fra Forskningscenter for Økologisk Jordbrug (FØJO), men drives nu med bidrag fra samarbejdspartnere og interessenter.

CRUCIAL er en forkortelse for: Closing the Rural-Urban Nutrient Cycle - Investigations through Agronomic Long-term experiments

De vedholdende forsøg over mange år øger konstant vores videnspulje. Hvert nyt år bygger på en kendt historik fra de mange forrige år, og dukker ny stoffer og emner op, findes allerede et datagrundlag og en præget jordbund at undersøge.

På verdensplan er kun gennemført ganske få længerevarende (>5 år) forsøg med vedvarende tilførsel af affaldsbiomasse til dyrket jord.

Vores viden om evt. langsigtede effekter er imidlertid mangelfuld, først og fremmest fordi det kræver længevarende forsøg (typisk over 10-20 år) under markforhold at kunne konkludere med en rimelig videnskabelig sikkerhed – sådanne forsøg er ressourcekrævende at vedligeholde over en lang tidshorisont, en opgave der ikke harmonerer med den fremherskende forskningspolitik i mange lande.

CRUCIAL forsøgets formål er at skabe grundlag for at vi nu og i fremtiden vil kunne vurdere de langsigtede virkninger på miljø og jordkvalitet, samt dyrs og menneskers sundhed ved anvendelse af byernes affaldsstoffer til jordbrugsformål.

Institutionelt og internationalt samarbejde

Gennem årene har der fundet et omfattende forskningssamarbejde sted for at undersøge effekterne af den langvarige brug af affaldsbiomasse på jordens funktion og sundhed. Ud fra vores forskningspublikationer fremgår det, at der har været samarbejde med de fleste danske universiteter, og en lang række udenlandske forskningsinstitutioner. Det er forsøgt antydet i nedenstående figur.



Figur 3. Oversigt over danske og internationale samarbejdspartnere

Forsøgets filosofi

Idéen til forsøget opstod i en diskussion med repræsentanter for økologisk jordbrug, som var optaget af om det var muligt at få næringsstoffer retur fra byerne. Var det sikkert? I lyset af de forbedringer der er sket i samfundets affaldsstrømme, som belyst ovenfor, var vores hypotese, at det er sikkert at recirkulere. Men hvordan skulle man fastslå dette?

Vi indså, at der var behov for tværfaglige studier for at demonstrere og forstå virkningerne af gødskning med husdyrgødning, human urin og affaldsstrømme fra byerne. Så hovedspørgsmålet, vi ønskede og fortsat ønsker at adressere med langtidsforsøget, kan formuleres således:

Hvordan påvirker stofomsætning plante- og jordkvaliteten, miljøet og integriteten af landbrugsproduktionssystemer? Stofomsætning er her bredt defineret og omfatter f.eks. næringsstoffer, tungmetaller og xenobiotika, lægemiddelrester, patogener og gener.

I dansk landbrug reguleres brugen af spildevandsslam og komposteret husholdningsaffald på baggrund reglerne i Affald-til-Jord bekendtgørelsen samt af fosforindholdet, hvorden årlige anvendelse er begrænset til 30 kg fosfor/ha. I CRUCIAL forsøget har vi bevidst overskredet denne lovfæstede begrænsning for at repræsentere 'worst case'-scenarier for affaldsgenbrug gennem acceleration. Således vil nogle af de gødskningsregimer, der anvendes i dette feltforsøg, uundgåeligt føre til overgødskning med fosfor og ubalancerede input sammenlignet med god landbrugspraksis, hvilket i nogle tilfælde resulterer i en fosforforsyning svarende til >200 års gødskning efter gældende regler, men se tabel 1 nedenfor.

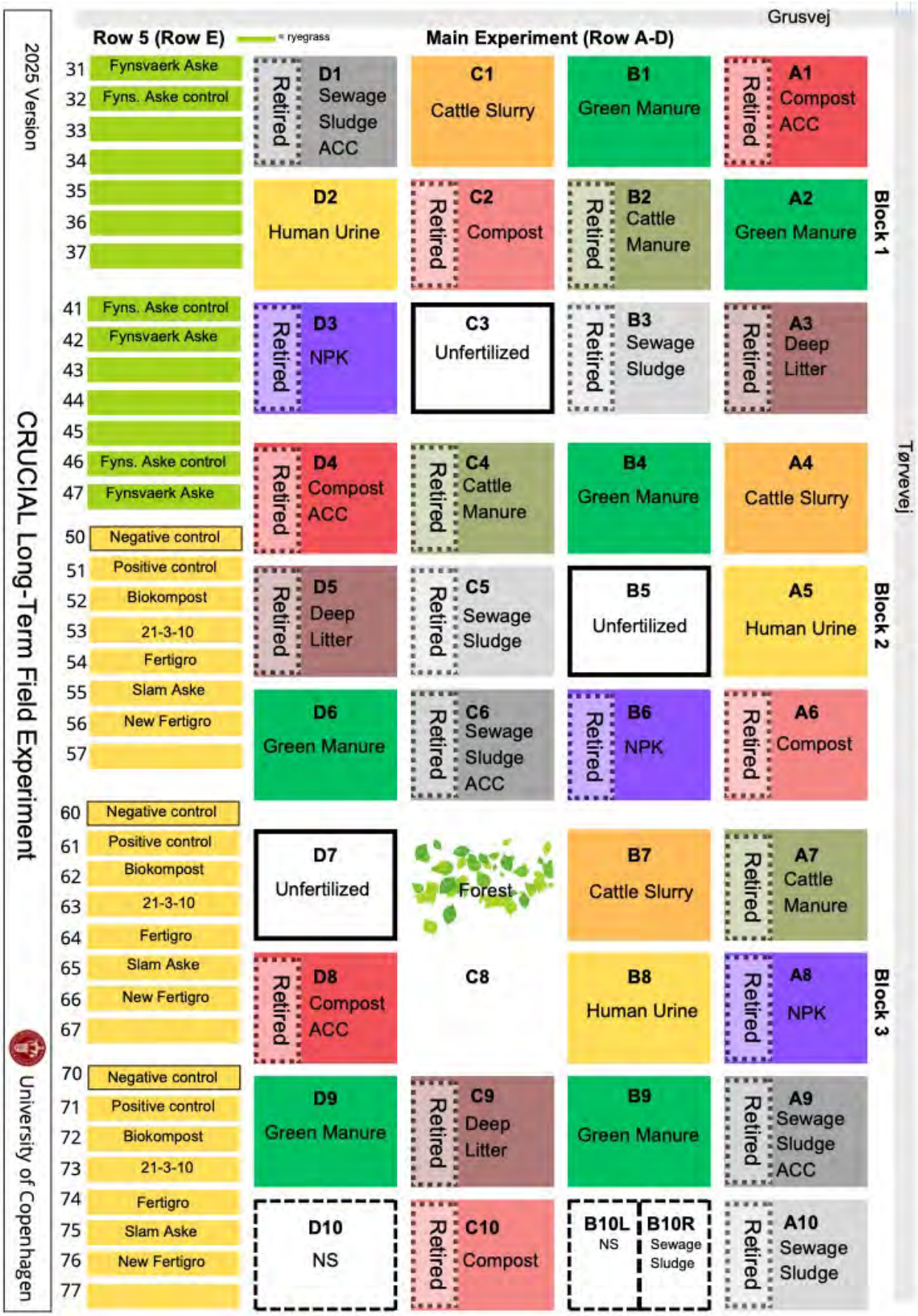
Forsøgets design

CRUCIAL-feltforsøget, er etableret 20 km vest for København (Danmark) på Københavns Universitets forsøgsgård. Ifølge FAO-klassificeringen kan jorden beskrives som en Luvisol med en sandet lerjordstekstur (Tabel 1), og i den danske klassificering er det JB5/JB6. Forsøget blev etableret i 2003 og designet i randomiserede blokke med 11 gødningsbehandlinger arrangeret i triplikater på tværs af 33 parceller. Gødningsmængderne var baseret på mineralgødningsækvivalenter (MFE) og blev justeret for at overholde danske regler for maksimale gødningsmængder. De effektive N-tilførselsmængder var beregnet til at være ca. 110 kg N/ha^{-1} $år^{-1}$. Den samlede N-udnyttelseseffektivitet baseret på lovkrav var: 70 % for kvæggylle og human urin, 45 % for spildevandsslam og 40 % for kompost. Marken har været drevet i kontinuerligt sædskifte med forskellige kornsorter siden 2003. Til denne undersøgelse blev der valgt 6 behandlinger med 3 replikater: ugødet (U), human urin (HU), spildevandsslam (SS), komposteret husholdnings og have parkaffald (CH), uorganisk gødning (NPK) og kvæggylle (CS). Der er desuden lavet accelererede behandlinger med meget højere tilførsel af effektivt N (ca. 330 kg N/ha^{-1} $år^{-1}$). Dette er tilfældet for spildevandsslam (SSA), komposteret husholdnings- og have-og parkaffald (CHA), og kvægmøg acceleret (CMA).

Human urin blev indhentet fra en bebyggelse i Albertslund (Hyldespjældet) og fra et bofællesskab i Trekroner (Munksøgård). Komposten blev produceret af en privat virksomhed (BioVækst, Solum) ved hjælp af AIKAN-teknologien og modtog sorteret organisk affald fra husholdninger. Husholdningsaffaldet blev kombineret med have- og parkaffald, der blev pakket i lukkede beholdere i 20 dage, hvor opløseligt kulstof blev udvundet til biogasproduktion. Efterfølgende blev materialet luftet og komposteret i et lukket rum i en måned. Endelig blev materialet komposteret i det fri i cirka 3 måneder indtil modenhed. Spildevandsslammet blev indhentet fra et offentligt renseanlæg (BIOFOS, Avedøre), der modtager blandet spildevand fra industrier og private husholdninger fra København, hvilket svarer til omkring 300.000 personækvivalenter. Den gennemsnitlige opholdstid i BIOFOS-rensningsanlægget var ca. 20 dage, og efterfølgende blev slammet flokkuleret med jern(III)salte (i øjeblikket $FeIIICl_3$) og derefter afgasset til metanproduktion i ca. 24 dage.

Ovenstående beskriver CRUCIAL hovedforsøget.

I tillæg til hovedforsøget er der siden 2015 udviklet en række ekstra forsøg nedenfor hovedforsøget (5te række), til afprøvning af industrielle produkter, fx aske fra kraftværker og afbrændt spildevandsslam, eller organiske restprodukter fra industrien. I det følgende arbejdes alene med den viden, der udgår fra hovedforsøget, men vi har indtegnet alle forsøg i figur 4 nedenfor. De ekstra forsøg bidrager med økonomi til at drive hovedforsøget. Desuden forventer vi, at der i de kommende år vil kunne uddrages værdifulde indsigter fra disse.



Figur 4. Kort over CRUCIAL eksperimentet, som fylder ca. 5 hektar.

Forsøgets materialer

Fra forsøget høstes hvert år plantemateriale og ca. hvert fjerde år indsamles jord, som repræsenterer de forskellige plots. Desuden indsamles gødningsprøver.

Dette bliver arkiveret, og pt forefindes følgende:

Jordprøver, der over >20 år registrerer de ændrede kulstof-, fosfor- og kvælstoftilførsler fra forskellige organiske gødningsstoffer.

Over 20 års prøver af organisk gødning og byaffald, der viser, hvordan det affald, der produceres af vores samfund, ændrer sig over tid (f.eks. reduktion af tungmetalindhold i spildevandsslam).

Over 20 års planteprøver (korn og halm), der viser, hvordan tilførsler af organisk gødning har påvirket næringsstofindholdet i korn.

CRUCIAL databasen

Der er gennem årene etableret en database, som indeholder:

- Mere end 20 videnskabelige publikationer om forskellige emner og de tilhørende data
- Årlige optegnelser over elementindholdet i gødning, jord og planter
- Årlige optegnelser over jordtemperatur
- Jordegenskaber (tekstur, densitet, pH)
- Isotopværdier i jord, planter og gødning (N, C, O-P)

Udbragte mængder af stof

Nedenfor har vi opsummeret et udsnit af de stofmængder, som er bragt ud på forsøgets plots gennem årene 2003-2022. Der er tale om vores bedste estimater, idet vi ikke har nøjagtige afvejninger af lastbillæs udbragt de første mange år. Her bruger vi de mængder vi har bedt om at få leveret. I det seneste år, har vi fået data fra frontlæsseren på den traktor der bruges til at flytte de fleste af produkterne (på nær human urin).

Tabel 1. Estimerede mængder af stof der er udbragt i CRUCIAL behandlinger (akkumuleret) gennem alle årene 2003-2022.

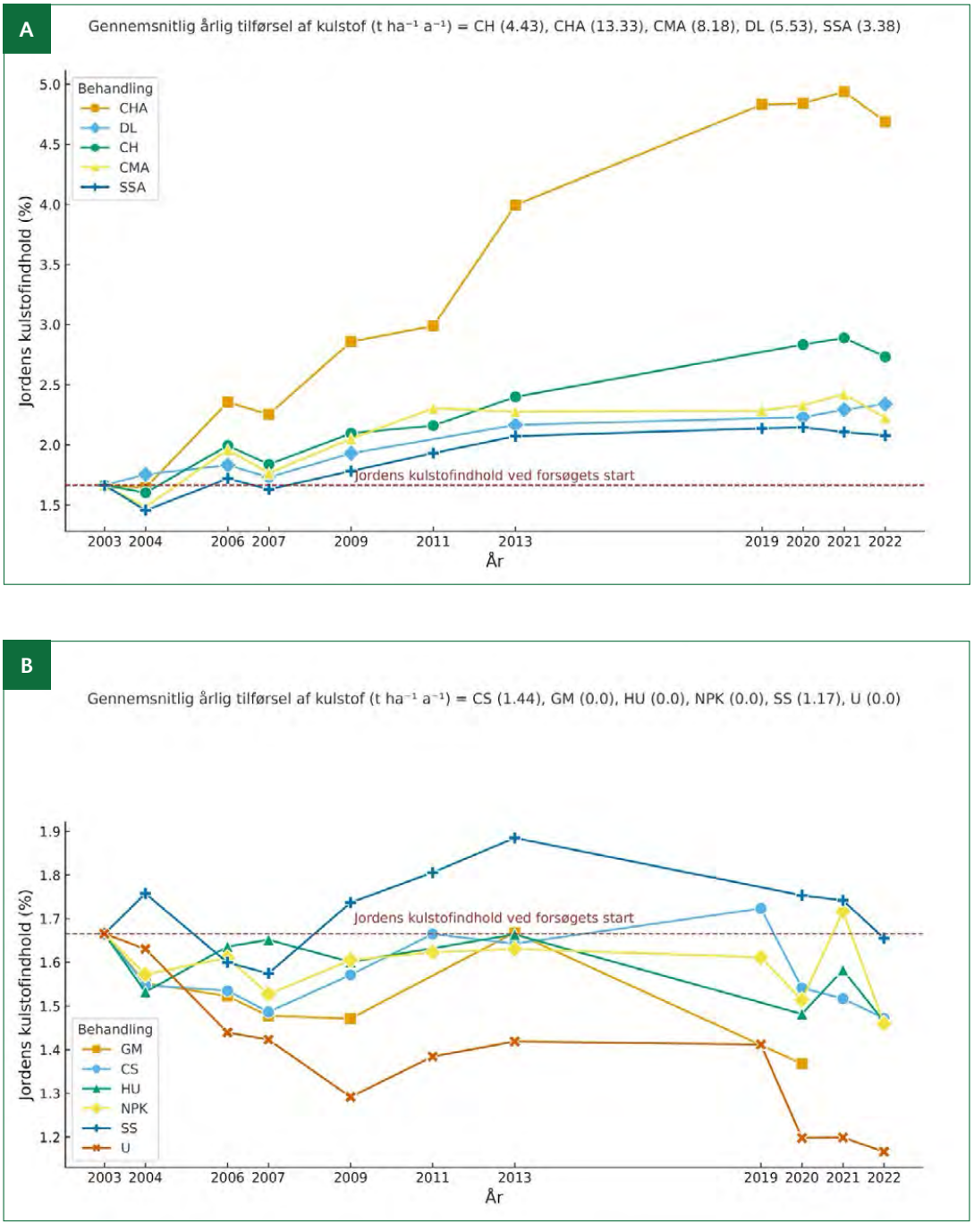
Behandlinger: CH – Solum kompost, CHA Solum kompost acceleret, SS Biofos spildevandsslam, SSA Biofos spildevandsslam acceleret, CMA kvægmøg accelleret, CS Kvæggylle, DL dybstrøelse, HU Human Urin

Behandling	C input	N input	P input	K input	S input	Zn input	Pb input	Cd input	Cu input	Na input	års lovlig P udbringning[§]
	tons /ha					kg /ha					
CH	87.44	7.99	2.11	3.72	0.96	107.5	6.5	0.2	49.7	1397	70
CHA	262.50	23.88	6.32	11.11	2.87	322.6	19.5	0.7	149.3	4181	211
SS	23.08	3.31	2.56	0.21	0.89	54.4	2.7	0.2	19.7	115	85
SSA	68.45	9.83	7.48	0.62	2.61	160.2	7.7	0.7	57.8	340	249
CMA	148.98	8.31	2.28	6.36	1.25	46.3	1.1	0.1	9.1	575	76
CS	26.87	1.72	0.52	2.57	0.30	14.1	0.2	0.0	2.4	289	17
DL	111.11	6.96	1.26	8.31	0.94	40.0	0.5	0.1	4.8	456	42
HU	0.00	2.80	0.25	0.90	0.32	0.7	0.1	0.0	0.3	1206	8

[§] Beregning af 'lovlig P udbringning' er på basis af 30 kg P ha^{-1} per år.

Det ses at de accelererede behandlinger CHA og SSA repræsenterer mere end 200 års lovlig udbringning målt på fosfor, mens CMA svarer til 76 år hvilket nogenlunde rammer niveauet for CH (70) og SS (85).

Tidslinjer – kulstof i jord



Figur 5. Kulstof koncentrationer over årene i CRUCIAL. A. Behandlinger hvor kulstofindholdet stiger over tid: CH – Solum kompost, CHA Solum kompost acceleret, SSA Biofos spildevandsslam accelereret, CMA kvægmøg accelereret, DL dybstrøelse, B. Behandlinger hvor kulstofindholdet falder eller nogenlunde vedligeholdes: U ugødet, GM ugødet med undersået hvidkløver ca halvdelen af tiden, HU Human Urin, NPK handelsgøding, CS Kvæggylle, SS Biofos spildevandsslam i 'normal' dosis. Halmen er snittet og siden pløjet ned.

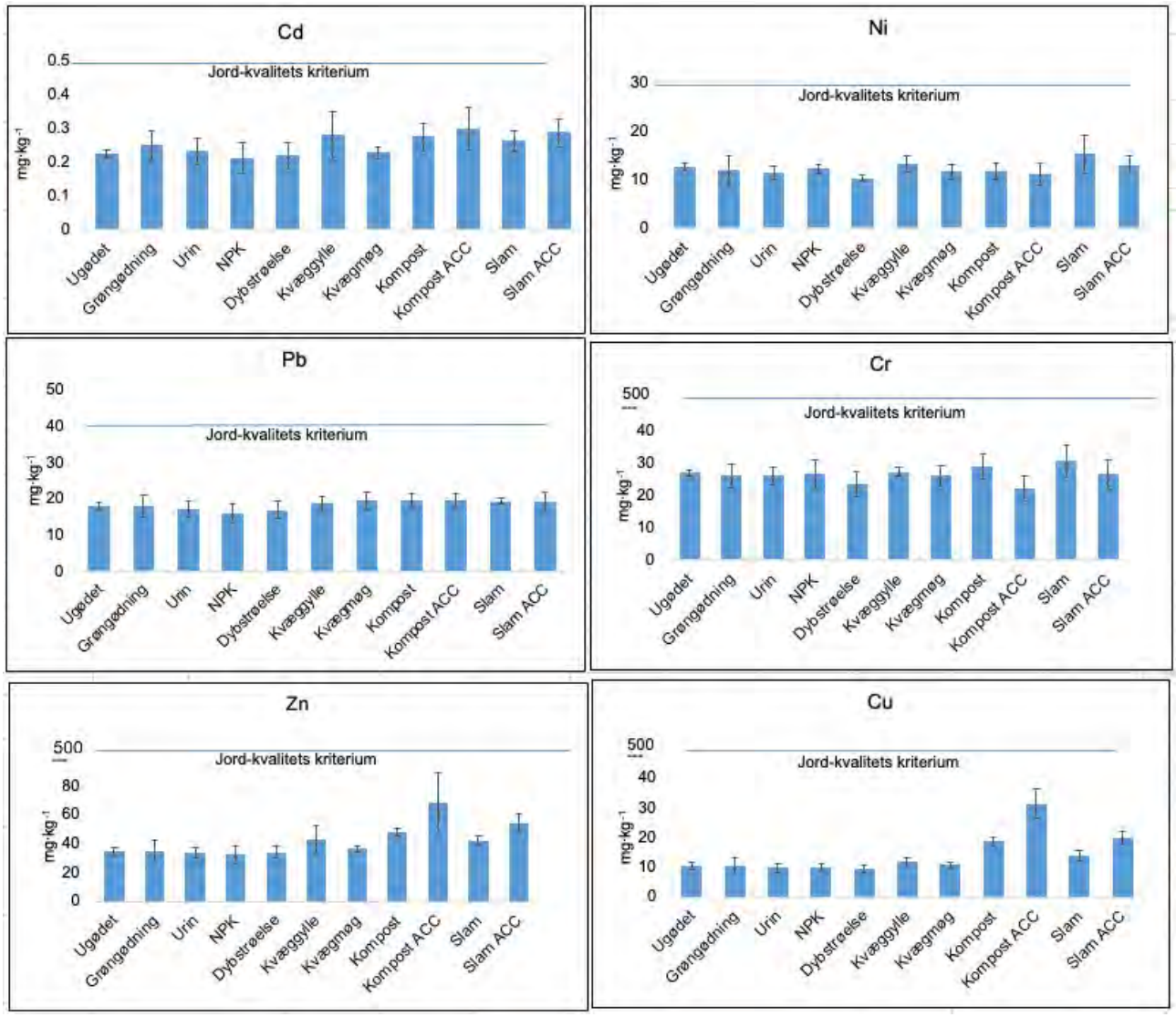
Vi er ikke kommet i mål med en gennemgribende analyse af udviklingen af kulstof data. Det første der springer i øjnene, er den ret store variation, der er mellem årene, når man følger en enkelt behandling. Følger vi spildevandsslam i figur 4A, ses det, at kulstof svinger ganske meget, og der måles mellem 1.7%-1.9% kulstof fra årene 2009-2013, og at den så tilsyneladende aftager i de senest målte år. Det kan være svært at sige, om dette afspejler den faktiske udvikling i marken, eller om der er tale om tilfældig variation som følge af prøveudtagningsusikkerhed. Det vil kræve nøjere analysearbejde at indkredse dette spørgsmål, og komme i mål med den bedst mulige fortolkning af virkningerne af de enkelte behandlinger på jordens organiske stof.

Det er imidlertid uomtvisteligt, at der i behandlingerne NPK, human urin og kvæggylle sker en nogenlunde opretholdelse af jordens organiske stof gennem forsøgets løbetid. Dette kan forstås ud fra markens forhistorie, hvor der i mange år blev gødet med handelsgødning, og at jordens organiske stofniveau derfor havde fundet et balanceniveau, for et kornsædskifte, som nu opretholdes. Bemærk at der ikke er tydelig forskel på kvæggylle (CS) og NPK og urin, selvom der i gennemsnit er tilført 1,4 tons kulstof per hektar årligt i kvæggyllebehandlingen.

Der sker en tydelig nedbrydning af kulstof i den ugødede behandling, og sideløbende hermed en forringelse af både den fysiske, kemiske, og biologiske kvalitet, hvilket er vist i et arbejde, som netop er indsendt af Veronika Hansen, adjunkt på Institut for Plante – og Miljøvidenskab. KU. Det er samtidigt tydeligt, at den behandling, som er ugødet men med hvidkløver undersået ca. halvdelen af tiden, klarer sig bedre, end den rene ugødede behandling.

I figur 5A ses behandlinger der øger jordens indhold af kulstof. Sammenholdt med, at der er stor forskel på, hvor meget kulstof der tilføres årligt (se mængder angivet øverst i figuren), kan behandlingerne rangordnes i deres effektivitet, så kompost er den mest effektive, efterfulgt at spildevandsslam, som er bedre end dybstrøelse og kvægmøg.

Tungmetalkoncentrationer i CRUCIAL behandlinger



Figur 6. Målte koncentrationer af udvalgte metaller i jord fra CRUCIAL udtaget i 2022 efter 20 års tildeling. Se tabel 1 for de mængder der er tilført.

Udbringning af slam og komposteret husholdningsaffald har haft signifikant effekt på jordens indhold af kobber, zink. Bemærk, at vi ikke kan se effekt på cadmium, bly, nikkel og chrom.

Udvalgte, væsentlige fund fra CRUCIAL

Jordens biologiske kvalitet

Bakteriesamfund

Et vigtigt fokusområde i løbet af forsøgets levetid har været undersøgelser af den biologiske tilstand i de forskellige behandlinger. Der er lavet flere undersøgelser af mikroorganismers funktion og diversitet (Pernille Hasse Busk Poulsen et al., 2013; Pernille H B Poulsen et al., 2013; Musovic et al., 2014; Riber et al., 2014). Til mikrobiologernes overraskelse var der ikke større påvirkning af bakteriesamfunds diversitet af behandlingerne. Der var flere fritlevende kvælstoffikserende bakterier i behandlinger, der ikke har fået tilført gødning overhovedet, og i behandlinger tilført kompost fandtes overhyppighed af arter af Firmicutes, som kan danner sporer under de høje temperaturer, som forekommer under kompostering.

Et særlig vigtigt studie (Riber et al., 2014) undersøgte de umiddelbare og langsigtede effekter på bakteriesamfund i jord, der blev tilført gødning fra husdyr, spildevandsslam og komposteret organisk affald ved hjælp af pyrosekventering og screening for horisontal overførsel af antibiotikaresistens. Jordprøver blev taget på forskellige tidspunkter (uge 0 i september, 3, 9 og 29 i april) efter tilførsel af kvæggødning, spildevandsslam og kommunalt fast affaldskompost. Bakteriesamfundets struktur blev analyseret ved hjælp af 16S rRNA amplicon pyrosequencing, og forekomsten af antibiotika- og kviksølvresistente Pseudomonas blev undersøgt. (Halling-Sørensen et al., 2005) publicerede lignende resultater fra et felt skala forsøg fra syd Danmark.

Bakteriesamfundets struktur: På fylogenetisk niveau forblev bakteriesamfundets struktur stort set uændret. Actinobacteria, Proteobacteria og Chloroflexi var de mest fremtrædende fyla, der reagerede på prøvetagningstidspunktet.

Sæsonændringer

Der blev observeret sæsonændringer med faldende bakterierigdom i uge 9 efterfulgt af en stigning i uge 29.

Pseudomonas

Rigdommen af Pseudomonas blev midlertidigt påvirket af gødningstilførslen, især i jord tilført slam og kompost.

Antibiotikaresistens

Gødningstilførsel havde en forbigående indvirkning på jordens resistensprofil; forekomsten af resistente isolater faldt med tiden efter gødningstilførsel, men vedvarende stammer viste sig at være multiresistente, også i ugødet jord.

Horisontal genoverførsel

Evnen til at optage resistensgener fra indfødte jordbakterier ved horisontal genoverførsel blev kun observeret i uge 0, hvilket indikerer en midlertidig stigning i forekomsten af overførbare antibiotikaresistensgener.

Konklusionen var at gødningstilførsel til landbrugsjord midlertidigt ændrede bakteriesamfundets struktur og øgede forekomsten af antibiotikaresistente bakterier. Disse ændringer var dog forbigående og faldt til grundniveauer efter 9 uger. Dette fund er siden blevet bekræftet i en dybtgående af Svensk landbrugsjord gødet med spildevandsslam over flere årtier, som viste ubetydelige risici for miljømæssig spredning af antibiotikaresistens (https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105339).

I de kommende år vil der komme flere undersøgelser af mikrobielle samfund i CRUCIALs behandlinger.

Der er grund til at glæde sig over de fund, der er gjort i CRUCIAL. De viser, at jord kan give en meget stærk beskyttelse mod spredning af resistens, og at bakteriesamfund i jorden er meget stabile. Det kan samtidigt give noget af forklaringen på, hvorfor vi gennem hundreder af år har levet fint med at tilføre husdyrgødning, som uvægerligt har et meget stort indhold af patogener, til den jord, vi får vores føde fra.

Fødekæderne med særlig fokus på nematoder

(Vuaille et al., 2022) undersøgte, hvordan langvarig brug af organisk affald (husdyrgødning, spildevandsslam og urin) som gødning påvirker. 1) Jordens kvalitet 2) Forekomst af lægemiddelrester og personlige plejeprodukter (PPCPs), og 3) Jordens nematodefauna (mikroskopiske rundorme)

Fem behandlinger blev sammenlignet: husdyrgødning, spildevandsslam, urin, tidligere slam-behandling og NPK-gødning (kontrol). Jordprøver blev analyseret for PPCPs og nematodeaktivitet. *Caenorhabditis elegans* (C. elegans) blev brugt til at teste reproduktionsevne i laboratoriet.

Der blev identificeret 12 PPCPs, især i jord behandlet med slam og urin. Ingen kronisk toksicitet blev observeret i C. elegans. Jord behandlet med husdyrgødning og slam havde flest nematoder og bedre jordstruktur (mere organisk materiale, vandindhold og porøsitet). Slam forbedrede jordens kvalitet, men introducerede også kemiske stoffer.

Konklusionen var, at urbant og animalsk affald kan forbedre jordens kvalitet og bidrage til bæredygtig gødskning. Der blev ikke fundet skadelige effekter på jordens organismer, men der er behov for yderligere undersøgelser af langtidseffekter og risiko for overførsel til fødevarer.

(Johansen et al., 2023) undersøgte effekter af langvarig gødskning med human urin, komposteret husholdningsaffald og spildevandsslam på jordens nematodebestand og nematode-samfundsstruktur.

Der blev sammenlignet jord behandlet med: Human urin, Komposteret husholdnings – og have- ogparkaffald, Spildevandsslam, samt kontrolbehandlinger: NPK-gødning, husdyrgødning og ingen gødning.

Jordprøver blev analyseret for pH, organisk materiale, næringsstoffer, tungmetaller og mikroorganismer. Nematodesamfund blev analyseret med DNA-metabarcoding.

Mikroorganismer i jorden trivedes bedst i behandlinger med højt indhold af organisk materiale som husdyrgødning, kompost og spildevandsslam. Både bakterier, svampe og små protozoer (som amøber og ciliater) var mest talrige i disse behandlinger.

Nematod-samfundets struktur blev påvirket af jordens pH og indhold af organisk materiale.

Der blev ikke fundet tegn på, at tungmetaller eller forurening havde negativ effekt på nematodsamfund. Den såkaldte "Maturity Index 2–5", som bruges til at vurdere forureningseffekter, viste ingen forskelle mellem behandlingerne.

Konklusionen blev, at langvarig anvendelse af nutidens urbane affaldsprodukter, som gødning, har ikke haft negative effekter på jordens sundhed eller nematodesamfund. Tværtimod har det forbedret jordens struktur og øget mængden af nedbrydere i jorden.

Regnorme

(Palmqvist et al., n.d.) undersøgte hvordan langvarig gødskning med organisk affald – især komposteret husholdningsaffald og spildevandsslam – påvirker regnormen *Aporrectodea caliginosa*. Der fokuseres særligt på effekter af mikroplastik i jorden, da disse affaldsprodukter ofte indeholder både tungmetaller og mikroplast.

Jordprøver blev indsamlet fra CRUCIAL-forsøgsmarken ved Københavns Universitet, hvor forskellige gødningstyper har været anvendt i over 15 år.

Regnorme blev eksponeret i 12 uger for jord fra 7 forskellige gødningsbehandlinger samt jord tilsat mikroplast (polyethylen og polymethylmethacrylat).

Der blev målt følgende: Overlevelse, Kropsvolumen, Gravetid (hvor lang tid ormene var om at komme i jorden), og Reproduktion (antal og levedygtighed af kokoner). Ingen negative effekter blev observeret ved mikroplastbehandlingerne, selv ved høje koncentrationer (0,1 %). Regnormene i jord med spildevandsslam og komposteret husholdningsaffald havde generelt bedre vækst og reproduktion end i konventionelt gødet jord. Gravetiden var længere i ugødet jord, sandsynligvis pga. lavt indhold af organisk materiale og kompakt jordstruktur

Det konkluderes, at: "Langvarig gødskning med komposteret husholdningsaffald og spildevandsslam havde ingen negative effekter på regnormens vitalitet. Tværtimod kan det høje indhold af organisk materiale i disse gødningstyper forbedre regnormenes trivsel. Mikroplastik i realistiske koncentrationer udgør ikke en umiddelbar trussel, men der er behov for flere studier under naturlige forhold og over længere tid".

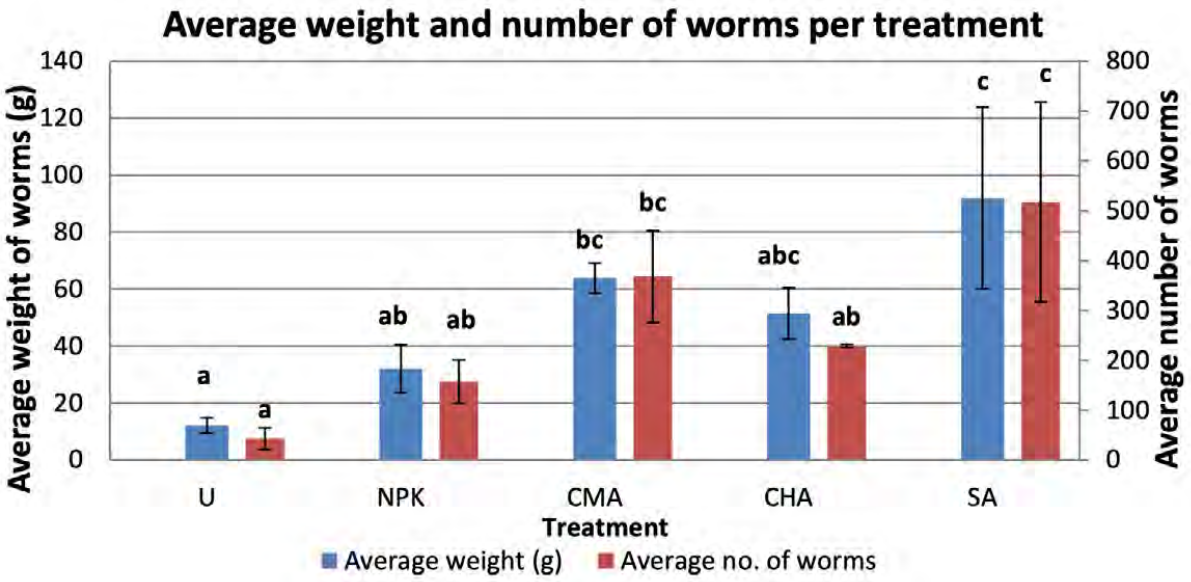
Der er desuden lavet et speciale: "Investigating the effects of different fertilizing treatments on earthworms – View on potential impacts of microplastic" af Nadja Karling (2018).

Herfra uddrages følgende:

I et pilotforsøg blev det undersøgt om regnorme kan optage mikroplastik (fibre og kugler) og om det påvirker deres vægt, kropsvolumen og gravetid. Regnorme kunne optage mikroplastik, men der blev ikke fundet signifikante negative effekter på deres vækst eller reproduktion.

Det kontrollerede labstudie viste ingen signifikante forskelle i kropsvolumen, gravetid eller klækningstid mellem gødningstyperne. Komposteret husholdningsaffald i høj dosis gav den højeste kokonproduktion og havde også det højeste indhold af organisk materiale, Slambehandlingen gav den største vægtøgning hos regnormene, hvilket tyder på en ressourceallokering mellem vækst og reproduktion

Feltstudiet viste, at spildevandsslam (SA) muligvis giver bedre næringsstoftilgængelighed end komposteret husholdningsaffald (CHA), hvilket resulterede i flere regnorme i SA-behandlingen.



Figur 7. Den gennemsnitlige vægt og antal orme i de forskellige behandlinger fra CRUCIAL. Behandlingerne er; U: Ugødet, NPK: Gødskning med nitrogen, fosfor og kalium, CMA: Accelereret kvæggødning, CHA: Accelereret komposteret husholdningsaffald, SA: Slam accelereret. n = 3, Gennemsnitsværdi ± SD. Forskellige bogstaver angiver signifikant forskel mellem behandlinger (Tukeys test $p < 0,05$).

Følgende kunne konkluderes:

Mikroplastik udgjorde ikke en umiddelbar trussel mod regnormen Eisenia veneta.

Gødningstyperne påvirkede regnormenes antal og vægt, hvor slam gav anledning til højest antal og vægt.

Jordens fysiske kvalitet

Påvirkningen af langvarig tilførsel organiske gødninger på jordens fysiske egenskaber er undersøgt af (Peltre et al., 2015) og et nyligt afsendt studie (ikke publiceret) ledet af Veronika Hansen.

Det første studie (Peltre et al., 2015) undersøgte, påvirkningen af jordens organiske kulstofindhold (SOC), og energiforbruget ved jordbearbejdning. Fokus var især på trækkraft og beregning af brændstofforbrug ved harvning.

Hovedresultater

SOC steg fra 1,4 % i NPK-behandlet jord til op til 3,5 % i jord med accelereret komposttilførsel.

Øget SOC medførte lavere massefylde og højere porøsitet.

Trækkraften ved jordbearbejdning faldt signifikant med stigende SOC og faldende massefylde,

Brændstofforbruget ved harvning kunne reduceres med op til 25 % ved høj komposttilførsel og 14 % ved normal komposttilførsel sammenlignet med NPK-behandling.

Der blev ikke fundet tegn på, at typen af organisk affald (f.eks. kompost vs. slam) havde en selvstændig effekt på trækkraften ud over SOC-indholdet.

Konklusion

Langvarig tilførsel af organisk affald til jorden kan forbedre jordens struktur og reducere energiforbruget ved jordbearbejdning. Dette bør medregnes i miljøvurderinger af affaldsgenanvendelse, f.eks. i livscyklusvurderinger (LCA).

Veronika Hansen (adjunkt på Institut for Plante og Miljøvidenskab, KU) har i endnu upublicerede studie undersøgt langtidseffekter (>20 år) af forskellige biobaserede gødninger (herunder kompost, spildevandsslam, kvæggylle og menneskelig urin) på jordens sundhed og afgrødeproduktivitet, sammenlignet med konventionel NPK-mineralgødning.

Hvad angår de fysiske mål blev det fundet, at kompost og spildevandsslam øgede SOC, porøsitet, vandretention markant.

Kvæggylle havde minimal effekt på SOC trods højt betydelig kulstoftilførsel. Menneskelig urin opretholdt SOC-niveauer som NPK, men forbedrede ikke jordens fysiske egenskaber pga. manglende organisk materiale.

Det blev konkluderet, at selv om mineralsk gødning kan forbedre visse fysiske og kemiske jordegenskaber og opretholde afgrødeproduktivitet, giver den ikke de samme langsigtede fordele for jordens sundhed som organiske jordforbedringsmidler.

Dette antyder, at en balanceret tilgang, der kombinerer både organiske og mineralske gødninger, kan være den mest effektive strategi til at opretholde og forbedre jordens sundhed og afgrødeudbytte.

Overordnet set forbedrede langvarig anvendelse af kompost og – i nogen grad – spildevandsslam flere centrale jordparametre, herunder jordens organiske kulstof (SOC), kationbytningskapacitet (CEC), jordens tæthed, vandretention, porøsitet, lerdispersion og mikrobiel respiration (MSIR).

Jordens kemiske kvalitet

Veronika Hansens endnu upublicerede studie fandt at human urin gav samme udbytte som NPK og viste høj kvælstofgødningseffekt. Kompost og spildevandsslam forbedrede næringsstofpuljer, og øgede jordens kationombytningskapacitet, men havde lavere udbytte pr. N-enhed. Behandling uden gødning resulterede i markant forringelse af jordens sundhed og produktivitet.

López-Rayo et al., 2016 evaluerede, hvordan langvarig anvendelse af restprodukter fra byer (f.eks. spildevandsslam og husholdningskompost) og husdyrgødning påvirkede jordens indhold af tungmetaller og planters optag af disse.

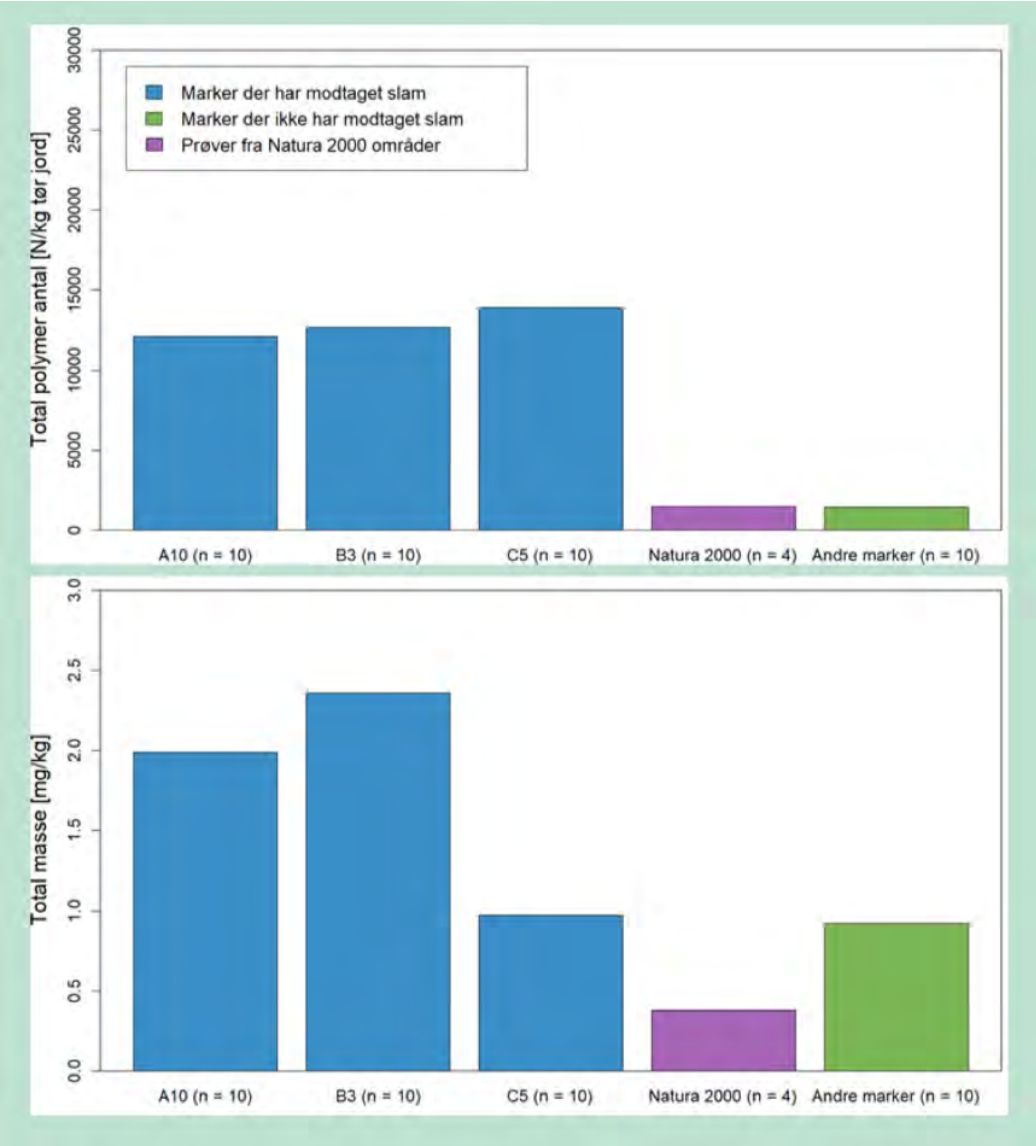
Undersøgelsen viste, at langtidsanvendelse af nutidige organiske affaldsprodukter har en begrænset indvirkning på koncentrationen af potentielt toksiske grundstoffer (tungmetaller) i jord og planter. Selv ved akkumulerede mængder svarende til mere end 100 års lovlig udbringning af spildevandsslam og husholdningskompost, blev der kun observeret en stigning i koncentrationerne af zink (Zn) og molybdæn (Mo). Da disse grundstoffer er essentielle for planter, fremhæver det de potentielle fordele ved at genanvende disse materialer.

Der blev ikke observeret nogen signifikante effekter på koncentrationen af tungmetaller i plantemateriale, bortset fra Cadmium (Cd) i tilfælde af stærkt accelereret udbringning af spildevandsslam svarende til knapt 200 års lovlig anvendelse. Selv i dette tilfælde lå Cd-koncentrationen under de anbefalede grænseværdier for fødevarer og foder.

Spildevandsslam og kvæggødning viste sig at være gode kilder til at øge fosforindholdet i planter, og alle typer gødning bidrog til øget udbytte. Jorden viste sig at være et robust system, der kunne håndtere kumulative tilførsler af metaller, med kun en let stigning i pH, hvilket var forbundet med øget Mo-koncentration i planter. Niveauerne af tungmetaller i jorden forblev under lovgivningsmæssige grænser – selv ved de accelererede behandlinger.

Mikroplast i jord

Jes Vollertsens gruppe (AU) har på CRUCIAL undersøgt metodiske spørgsmål vedrørende prøvetagning, størrelsesfordeling og baggrundsniveau for mikroplast i spildevandsslam udbredt på landbrugsjord (Klemmensen et al. 2023.). 44 prøver analyseret, 30 fra slambehandlede marker, 10 fra andre landbrugsjorder og 4 fra Natura 2000 områder. De 30 prøver fra slambehandlede marker var taget fra 3 forskellige forsøgsmarker fra CRUCIAL, der tidligere har modtaget spildevandsslam svarende til cirka 40 års almindelig belastning. Undersøgelsen er primært fokuseret på at finde en optimal prøvetagningsstrategi, og egentlig ikke hvordan mikroplast påvirker systemet. Nedenfor gengives resultatet af sammenligningen af CRUCIAL jordene med almindelig landbrugsjord, og jord fra Natura 2000 områder.



Figur 8. Mængde og antal polymer partikler fundet på CRUCIAL (A10, B3 og C5), sammenlignet med almindelig landbrugsjord, og jord fra Natura 2000 områder.

Det ses at selv på almindelige marker uden forhistorie med spildevandsslam findes ca. 1 mg mikroplast per kg, det tilsvarende på C5 og omkring det dobbelte på A10 og B10. Der er dog betydelig forskel vedrørende antallet af partikler.

Spørgsmålet er, hvad mikroplast betyder?

Johansen et al., 2024 har lavet en læseværdig undersøgelse af litteraturen vedrørende omfang og effekter af mikroplastforurening i jord. De uddrager følgende: "Eksperimenter med regnorme og kvantificering af forskellige jordorganismer indikerer ikke, at husholdningsaffald og spildevandsslam, inklusive de iboende forurenende stoffer, påvirker jordens sundhed negativt. Faktisk var væksten af regnorme og forekomsten af organismer ofte højere i disse behandlinger sammenlignet med NPK-gødede eller ugødede parceller, sandsynligvis på grund af indholdet af organisk materiale i affaldsproduktet. Baseret på disse vurderinger konkluderer vi, at den potentielle risiko ved de nuværende niveauer af mikroplast i terrestriske miljøer er lav for landbrugsjord, men der er behov for flere undersøgelser for at udføre en robust risikovurdering".

Annemette Palmqvist (RUC), er i gang med at undersøge en mulig nedbrydning af mikroplast i en række af behandlingerne i CRUCIAL.

Undersøgelser af PFAS-udbringning og udvaskning

Draborg H, 2023 undersøgte om anvendelse af spildevandsslam på landbrugsjord kan føre til forurening af grundvandet med PFAS-stoffer.

I jordprøver fandtes PFAS i den øverste meter af jorden, med højere koncentrationer i plots med ekstremt høj dosering. PFOS og PFOA var de mest dominerende stoffer.

Der blev ikke målt koncentrationer over Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterier, selv i jordprøver fra et plot der havde modtaget mere end 200 års lovlig dosis over en 20-årig periode.

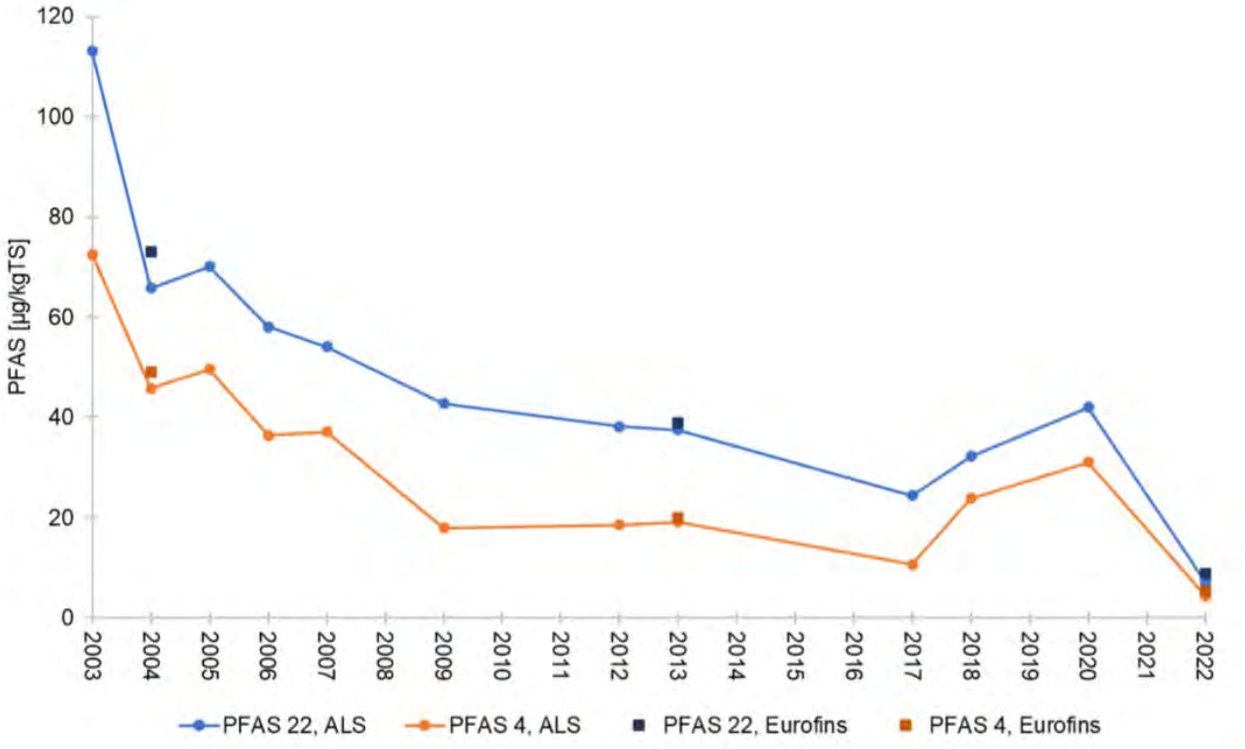
I grundvand blev PFAS påvist i 3 ud af 14 vandprøver, men kun én prøve overskred drikkevandskvalitetskriteriet (ca. faktor 2), og PFOS dominerede vandprøverne.

Et meget vigtigt fund var at PFAS-niveauer i grundvand er 525–1650 gange lavere end teoretisk beregnet ud fra jordkoncentrationer.

Endnu et meget interessant fund blev konstateret ved at analysere spildevandsslam fra CRUCIAL's arkiv (af frosne gødningsprøver). For god ordens skyld blev der sendt prøver til 2 uafhængige analyseleverandører (Eurofins og ALS). Der var fuld overensstemmelse mellem laboratorierne (figur 9).

Spildevandsslammet stammer fra BIOFOS Avedøre, og har et opland på ca. 300.000 person ækvivalenter. Det er en god afspejling af den samfundsmæssige PFAS-udledning, som er faldet med en faktor 12 fra 2003 – 2022.

Parallelt med undersøgelserne af slam udbragt til CRUCIAL viste (Hull et al., 2023) at blodkoncentrationerne af PFOS og PFOA i den danske befolkning er faldet betydeligt fra slutningen af 1990'erne og frem til 2021, hvilket afspejler en udfasning af produktionen og reguleringen af brugen af disse PFAS.



Figur 9. Summen af 22 (blå) og 4 PFAS (orange) i spildevandsslam udbragt på CRUCIAL markerne i perioden 2003-2022.

Undersøgelser af jordens organiske stof

Ved hjælp af biomarkører, og bl.a. termisk analyse undersøgte Peltre et al., 2017 hvordan gentagen tilførsel af forskellige typer organisk affald påvirker sammensætningen af jordens organiske materiale over 12 år. Kompost og kvægmøg førte til højere termisk stabilitet og mere lignin i jorden, hvilket tyder på ophobning af mere modstandsdygtigt organisk materiale. Spildevandsslam og NPK resulterede i mere oxideret og mikrobielt nedbrudt SOM. Komposten var mest effektiv til at øge jordens kulstofindhold, med 45 % af det tilførte kulstof bevaret i jorden. Kvægmøg stimulerede mikrobiel aktivitet mest, hvilket afspejledes i højere indhold af aminosukre. Komposten førte til en mere bakteriedomineret mikrobiel sammensætning, sandsynligvis pga. direkte tilførsel af bakterier med komposten.

Det blev konkluderet, at forskellige typer organisk affald påvirker både mængden og typen af kulstof, der ophobes i jorden. Kompost bidrager med mere stabilt kulstof, mens kvægmøg fremmer mikrobiel aktivitet og dannelse af mikrobielt afledt SOM. Disse forskelle har betydning for jordens frugtbarhed, struktur og evne til at lagre kulstof på lang sigt.

I et helt nyt studie (Magid et al., 2025) blev det ligeledes fundet, at alle undersøgte organiske gødningstyper, bidrager til opbygning af stabilt organisk materiale i jorden, men med forskellig effektivitet og mekanismer.

Kompost og slam er særligt lovende til langvarig kulstoflagring og kan bidrage til afbødning af klimaeffekter. Stabilisering sker både via kemisk modstandsdygtighed og binding til mineraler.

Tværgående perspektiver og samfundsmæssig betydning

Teknologisk udvikling af slambehandling, og konsekvenserne for recirkulering

Et nyligt afsluttet projekt undersøgte slambehandlingsteknologier og gødningsværdi af slam-rest produkter belyst gennem LCA og dyrknings- og inkubationsforsøg (Magid et al. 2024). Potte- og rammeforsøg viste, at behandlinger med slam giver anledning til langsigtet optag af P i rajgræs, svarende til 70-140% af handelsgødnings P. Det viste, at slam fungerer som en 'slow-release' gødning, hvilket i nogle tilfælde resulterede i høj langsigtede P virkning. Der blevet fundet meget lavt eller intet optag fra den biochar, der blev leveret fra Vandcenter Syd, og et optag fra aske fra spildevandsslam, på ca. 30% af TSP (handelsgødning). Virkningen af TSP faldt betydeligt med tiden, mens det afvandede slam bedre kunne opretholde sin virkning.

I en fokusgruppe med landbrugskonsulenter, blev der set på hvilke muligheder, der kan være for at afsætte slam eller slambaserede produkter som fosfor gødning. For landmænd der har lave eller moderate fosfortal vil det være 'no go' at udbringe P med lav virkning, da det vil forringe dyrkningssikkerheden. For landmænd der har gode P tal ville en gødning med 30-40% virkning af TSP i en del tilfælde være OK at bruge ved gødskning af vintersæd – men skal suppleres med handelsgødning, hvis den skal ud til vårsæd.

Sammenfattende kan det på baggrund af arbejdet med forsøgene og med landbrugsaktører konkluderes, at virkningsgraden er vigtig som dokumentation, hvis produktet skal kunne afsættes og substituere import af P i DK. Hvad angår aske fra spildevandsslam, er der behov for en del yderligere dokumentation for, om det kan opretholde fosfor tilgængelighed til kornafgrøder på lang sigt. Hvad angår biochar, er det klart, at det er ganske vigtigt at sikre, at tilgængeligheden af P kommer op på et højere niveau, end det der blev fundet i VUDP-projektet.

Hvordan er risikoen ved at anvende urbane restprodukter sammenlignet med husdyrgødning og handelsgødning?

Det Økologiske Erhvervsteam, nedsat af Miljø- og fødevareministeren, anbefalede i April 2017, at økologerne skulle have mulighed for at anvende næringsstoffer fra behandlet husspildevand, forudsat at det var sikkert, og kunne forklares til forbrugerne.

Der blev derfor udarbejdet en rapport (Pedersen, KE; Brandt, KK; Hansen, M Cedergreen, N; Magid, 2019), som giver et overblik over risikofaktorer for mennesker og jordmiljøet ved gødskning med kvæg og svinegylle, samt biogødning fra spildevand. Rapporten er efterfølgende bearbejdet til en videnskabelig artikel (Magid et al., 2020).

Formålet var at skabe et overblik over de humane såvel som miljømæssige risici, der er forbundet ved brug af henholdsvis svine- og kvæggylle og spildevandsslam som gødning på landbrugsjorden. Der blev lavet kvantitative risikovurderinger for jordmiljøet af en lang række organiske fremmedstoffer og medicinrester, som kan findes i slam og husdyrgødning. Dertil blev der lavet vurderinger af tungmetaller og østrogener.

Risiko for jordmiljøet

Tilstedeværelsen af uønskede forbindelser i slam og husdyrgødning har meget beskedent overlap (kun 4 metaller og seks organiske forbindelser er målt i både spildevandsslam og husdyrgødninger), hvilket gør en direkte sammenligning af den kumulative risiko for animalsk gødning og spildevandsslam noget vilkårlig. Manglen på overlap skyldes sandsynligvis forskellene i oprindelsen, men også på grund af historiske forskelle i overvågningsindsatsen. Der er en langt mere systematisk overvågning af slam end af husdyrgødning.

Den kumulative risikovurdering konkluderede, at der kan være en potentiel risiko ved anvendelse af slam og husdyrgødning i alle scenarier, mens svinegylle udgør en højere kronisk risikofaktor på grund af ret høje niveauer af Cu og Zn. Denne risiko vil dog mindskes efter at der i 2022 indføres ny regulering for medicinsk anvendelse af zink, samtidigt med den igangværende regulering af kobber er fuldt indfaset.

Det blev konkluderet, at de undersøgte organiske kemikalier, medicinske rester og østrogener fra gylle udgør ingen eller lav risiko for jordorganismer. Det skal dog bemærkes, at viden om organiske kemikalier i dansk gylle er sparsom, og selvom gylle forventes at indeholde mindre mængder af organiske kemikalier end slam, kan gyllen indeholde stoffer, der ikke er medtaget i den foreliggende vurdering.

Evaluering af spildevandsslam som gødning viste potentiel toksicitet af phthalater og triclocarban. Konklusionen er dog ganske usikker på grund af manglen på toksicitetsoplysninger såvel som specifikke danske målinger af koncentrationer af nogle af disse forbindelser. Det anbefales derfor, at disse forbindelser undersøges, så usikkerheden kan reduceres.

Risiko for human sundhed

En kvalitativ gennemgang baseret på 'state of the art' litteratur blev foretaget for potentielt skadelige tungmetaller, medicinrester og spredningen af antibiotikaresistens. Disse elementer er på nuværende tidspunkt vurderet til at udgøre den største bekymring for human sundhed i forbindelse med landbrugsmæssig brug af svine- og kvæggylle samt spildevandsslam.

Potentielt skadelige metaller

Tungmetaller (PTE) udgør en bekymring idet de kan akkumuleres i jorden. Metallerne fjernes udelukkende fra jorden via udvaskning og planteoptag. Mennesker kan udsættes for PTE via direkte indtag af plantemateriale. Cadmium og bly (Cd og Pb) er de mest fremtrædende af disse i dansk sammenhæng, når det kommer til direkte effekter på menneskers sundhed. En række af faktorer påvirker den biologiske aktivitet af PTE, den vigtigste af disse er pH. Ved at kontrollere pH gennem kalkning kan planternes optag af kationiske PTE (herunder Cd) minimeres. I en norsk risikovurdering af spildevandsslam blev det vurderet, indtaget af råvarer produceret på jorde beriget med slam gennem 100 år, kun ville øge Cd optaget per borger med mindre end 5% sammenlignet med baseline. Yderligere ser det ud til at niveauerne af Cd og Pb i afgrøder faktisk er faldende, på grund af de meget lavere forbrændingsrelaterede atmosfæriske udledninger i løbet af de seneste årtier.

Der vurderes, at der er ringe risiko forbundet med tungmetaller ved humant indtag af afgrøder gødet med spildevandsslam.

Medicinrester

I godkendelsesprocessen for veterinære lægemidler bliver den maksimale tilladte restkoncentration af medicin i slagtefærdige dyr, mælk eller æg beregnet. Dette gøres på baggrund af velgennemført videnskabelige studier og det sikrer, at det acceptable daglige indtag (ADI) ikke overskrides. Til gengæld bliver der ikke taget højde for den potentielle humane eksponering til veterinære lægemidler gennem gylle eller slam. Nogle veterinære lægemidler kan give en eksponering, der ligger meget tæt på ADI. En eventuel human eksponering ved overførsel fra gylle eller slam til planter kan derfor i teorien være problematisk. Der forefindes ganske få studier af transfer af veterinære lægemidler fra jord til planter, derfor bygger følgende stort set udelukkende på transfer af humane lægemidler. Et norsk studie undersøgte samtlige 1414 humane lægemidler på markedet i Norge. Af disse 1414 blev kun 14 vurderet til at overskride grænseværdier på 100 eller 10 µg/kg jord efter tilførsel af slam. De estimerede jordkoncentrationer var i alle tilfælde meget lav og lavere end den estimerede PNEC (Predicted No Effect Concentration).

Der findes ikke tilstrækkeligt data til at konkludere på risikoen ved planteoptag af veterinære lægemidler fra husdyrgylle, men det anses for usandsynligt, at planteoptaget af veterinærlægemidler i gylle fra svin og kvæg er af betydning for menneskers sundhed, og det konkluderes, at veterinærlægemidler og humanmedicinske rester i spildevandsslam ikke giver anledning til bekymring.

Spredning af antibiotikaresistens

Baseret på gennemgangen er det den sagkyndige opfattelse, at spildevandsslam ikke udgør en højere risiko for udbredelse og overførsel af antibiotikaresistens end husdyrgødning. Anvendelse af spildevandsslam til gødningsformål skønnes at udgøre en meget

lav risiko for spredning af antibiotikaresistens i miljøet, såfremt anvendelsen sker i overensstemmelse med den danske slambekendtgørelse.

Sammenfattende konkluderes det, at dansk spildevandsslam ikke udgør en større risiko for human sundhed og for jordmiljøet end svinegylle.

Forsigtighedsprincippet og dets udfordringer

Forsigtighedsprincippet bruges især i miljø-, sundheds- og fødevaresikkerhedspolitik og betyder, at man bør handle for at forebygge skade, selv hvis den videnskabelige dokumentation endnu er ufuldstændig eller usikker.

Grundtanken er: "Fravær af fuld sikkerhed er ikke et argument for at vente med at beskytte mennesker eller miljø, hvis der er risiko for alvorlig eller uoprettelig skade". Det er indskrevet i bl.a. EU's miljøpolitik og bruges ofte i regulering af kemikalier, genmodificerede organismer, klimaindsatser osv.

Forsigtighedsprincippet rummer flere indbyggede dilemmaer:

- Hvad er nok bevis?
- Risikoen er ofte baseret på foreløbige, usikre eller modstridende data.
- For lidt evidens kan føre til overdreven forsigtighed; for meget krav om bevis kan forsinke nødvendige tiltag.
- Økonomiske og sociale konsekvenser
- Forsigtighed kan medføre høje omkostninger, som ikke nødvendigvis står mål med risikoen.
- Beslutningslammelse

Hvis usikkerhed altid fører til at beslutninger afventes, kan det i sig selv skabe skade (fx ved at forsinke handling mod klimaforandringer).

Der er ofte en tendens til at fokusere vores bekymringer på hvad der i øjeblikket optager os (bl.a. på grund af skriverier i pressen, som kan vokse sig ud af proportioner).

Desuden er der en tendens til at fokusere på 'worst case' tilfælde, hvilket fører til at spørgsmålet om sandsynlighed negligeres.

Endelig er der en tendens til at se bort fra systemvirkningerne af, at forsigtighedsprincippet anvendes.

Således har der gennem årene ofte været bekymring omkring landbrugsmæssig udnyttelse af spildevandsslam, men det er sjældent belyst hvilke utilsigtede konsekvenser der kan være ved slamforbrænding. Nedenfor gøres et forsøg på delvist at belyse den 'globale' virkning af PFAS-reguleringen, som vil medføre, at en betydelig mængde af det slam, som i dag udnyttes i jordbruget, skal forbrændes.

Risikoen ved anvendelse af handelsgødning

Handelsgødning har mange fordele, i og med at det er let at udbringe, og lettere at styre end organiske gødninger, og har moderate miljøeffekter lokalt, hvis det bliver håndteret optimalt. Der mangler undersøgelser af, hvor stor en tungmetalbelastning der følger med import af særligt P gødninger i Danmark, men det er uundgåeligt, at der følger fx cadmium, nikkel, bly og arsen med, da de findes i fosfatrige bjergarter, som bruges ved fremstilling af P gødninger. Nziguheba and Smolders, (2008) undersøgte 196 handelsgødningsprøver fra EU-lande, og fandt en gennemsnitskoncentration af cadmium, svarende til 83 mg Cadmium pr. kg totalfosfor. Som nævnt ovenfor (Gennemførelse og anvendelse af slamdirektivet Afrapportering 2024), er cadmium-koncentrationerne i dansk spildevandsslam, i gennemsnit har et indhold på 36.3 mg Cd/kg totalfosfor. Det er interessant at Cd indholdet i slam i gennemsnit er ganske lavt sammenlignet med 196 handelsgødningsprøver fra EU-lande citeret ovenfor.

Bekendtgørelse om indhold af cadmium i fosforholdig gødning tillader kun import hvis det ikke indeholder mere end 48 mg cadmium (Cd) pr. kg fosforpentoxid (P_2O_5.). Omregnet til total fosfor svarer dette til ca. 110mg Cd per kg P.

Det er imidlertid ikke bare tungmetaller der er potentielt skadelige også 'globale' miljø og sundhedsskadelige effekter forbundet med produktionen af handelsgødnings N og P, hvor der forekommer udledning af klimagasser, små partikler og forskellige sundhedsskadelige stoffer.

Nedenfor er dette belyst med et regneeksempel, hvor udgangspunktet er en antagelse om, at de næringsstoffer, der bliver taget ud af kredsløbet p.g.a. forbrænding, skal erstattes ved produktion af 'nye' næringsstoffer.

Et scenarie baseret på PFAS reguleringen i Danmark

Det kan have store økonomiske konsekvenser og i værste fald være uden miljømæssig gevinst, hvis der tages politiske beslutninger 'i kampens hede'. Til at illustrere dette, vil der i det følgende blive vist et eksempel på, konsekvenserne af skrappe krav til PFAS-indholdet i spildevandsslam, som er meldt ud som en foreløbig vejledende grænseværdi på 10 µg/kg $PFAS_4$, og som efterleves i praksis.

Der tages udgangspunkt i mængder og analyser fra officielle rapporter. Disse tal vil over tid kunne ændres – f.eks grundet kildesporing i spildevandet, hvilket er rutine i dansk spildevandshåndtering, når en forureningskilde skal findes.

Fra analyser af $PFAS_{22}$ i DK-spildevandsslam er 50% percentilen 10 µg/kg tørstof, men 75% percentilen er angivet til 15 µg/kg (Gennemførelse og anvendelse af slamdirektivet Afrapportering 2024). Der foreligger ikke data på, hvor store mængder slam hver enkelt analyse repræsenterer.

I det følgende antages det derfor ganske konservativt, at gennemsnitskoncentrationen for $PFAS_{22}$ på spildevandsslam udbragt til landbrugsjord er 15 µg/kg tørstof (75% kvartilen), svarende til 15 mg / tons tørstof, eller 15 g / 1000 tons tørstof.

Ifølge affaldsdatabasen (LBST) blev der i 2020 udbragt noget mindre end 350.000 tons til landbrugsjord i DK, indeholdende ca. 20% tørstof - svarende til 70.000 tons tørstof.

Herefter kan vi estimere en udbringning af $PFAS_{22}$ til landbrugsjord i 2020 baseret på 70.000 tons tørstof * 15 mg / tons = 1.05 kg $PFAS_{22}$.

Dette kan sammenholdes med at det i en ny rapport fra Miljøstyrelsen (Lassen et al., 2024.) er estimeret, at det samlede forbrug af PFAS i Danmark i 2021 var 1.000 tons årligt.

Af forsigtighedshensyn anbefaler DCE Aarhus Universitet i deres rapport om udledning af afskæringsværdier for PFAS i spildevandsslam (Jensen, Fauser, et al. 2023)at bruge en vejledende maksimale koncentration på 15 µg/kg, som afskæringsværdi for $PFAS_4$. I Miljøstyrelsens grænseværdier for PFAS i miljøet (opdateret i november 2024) angives imidlertid 10 µg/kg, som afskæringsværdi for $PFAS_4$.

Ifølge rapporten (Gennemførelse og anvendelse af slamdirektivet Afrapportering 2024 er 75 kvartilen for $PFAS_4$ 9,7 µg/kg tørstof, altså tæt på den vejledende grænseværdi. Denne mængde vil med stor sandsynlighed mindskes i fremtiden som følge af indsatser for kildesporing, men er udgangspunkt i det følgende.

Med udgangspunkt i ovenstående kan følgende overvejes:

Implementering af reguleringen vil antageligvis medføre at op mod 25 % af det slam der i dag udbringes skal bortskaffes ved forbrænding. Det svarer til godt og vel 85.000 tons slam.

Ud fra den ovenstående massebalance vil bortskaffelsen af 85.000 tons slam tons våd slam svare til bortskaffelsen af ca. 0.5 kg $PFAS_{22}$ hvis vi regner med at de 'værste' 25% indeholder ca. halvdelen af det $PFAS_{22}$ der udbringes til landbrugsjord p.t.

Hvad koster implementeringen af PFAS-reguleringen?

De økonomiske omkostninger til forbrænding er højere end ved udbringning til landbrugsjord. Hvis eksisterende anlæg kan bruges, vil ekstraomkostningerne være ca. 500 kr. per tons vådt slam, hvis der skal bygges ny afbrændingsinfrastruktur, vil omkostningerne være højere, og da der ikke er afbrændingsanlæg i tilstrækkeligt omfang, vil kapaciteten skulle udviddes.

Hvis omkostningen derfor sættes til 1.000 kr. per tons vådt slam, vil de direkte afbrændingsomkostninger svare til ca. 85 mio. kr. årligt.

Imidlertid til der også være miljø- og ressourcemæssige omkostninger ved bortskaffelsen. Forbrændingen vil i sig selv give anledning til et forbrug af ressourcer, udledning af nogle skadelige stoffer (partikler, CO2 og måske PFAS og andre forureninger). Det er ikke muligt at beregne her. Der regnes i nogle vurderinger med at afbrænding af spildevandsslam giver anledning til reduktion af lattergas emission fra marker, men sådanne beregninger skal tage højde for at der også udledes lattergas fra den erstatnings gødskning der skal finde sted.

Der vil forekomme et tab af kulstof, som kunne være opbevaret i længere tid i jorden, men værdien af dette kan heller ikke beregnes her.

Endeligt vil der forekomme et tab af N og P.

I det følgende regner vi med: 85000 tons vådt slam.

- 1 tons slam (tørstof) indeholder ca. 30 kg P og ca. 60 kg N
- Den langsigtede virkning af 60 kg N i slam svarer til 30 kg N i handelsgødning.
- Alt det P der er i slam, skal erstattes af P i handelsgødning.

Tabel 2. Koefficenter for DALY (Disability-Adjusted Life Years)Y og udledningskoefficienter for CO_2eq per kg produceret gødning. Data fra Ecoinvent 3.11

		Metode	**Usetox v 2.13 Endpoint**	**Usetox v 2.13 Endpoint**	**IPCC 2021**
		Kategori	human toxicity: carcinogenicity	human toxicity: non-carcinogenic	Climate Change
Proces	Mængde leveret	Enhed	DALY	DALY	kg CO2-equivalents
Produktion af N	1 Kg N		1.66 E-07	1.24 E-06	4.78
Produktion af gødning P_2O_5	1 Kg P2O5		7.78 E-06	2.12 E-06	2.57

[Ψ] Summen af år med tidlig død og år med alvorlig funktionsnedsættelse

I det følgende regner vi med, at der skal bortskaffes 85.000 tons vådt slam, svarende til 17.000 tons tørstof. Ud fra forudsætningerne ovenfor svarer det til til 510 tons handels gødnings N, og 510 tons handels gødnings P. Det bemærkes at 1 kg P svarer til 2,45 kg P_2O_5.

Tabel 3. Beregning af DALY (Disability-Adjusted Life Years)Y og CO_2eq udledt for at erstatte tabte næringsstoffer i forbindelse med afbrænding af 85.000 tons våd slam svarende til bortskaffelsen af ca. 1 kg $PFAS_{22}$.

		Metode	Usetox v 2.13 Endpoint	Usetox v 2.13 Endpoint	IPCC 2021
		Kategori	human toxicity: carcinogenicity	human toxicity: non-carcinogenic	Climate Change
Process	Mængde erstattet (kg)	Enhed	DALY	DALY	kg CO2-equivalents
Produktion af N	510000		8.44E-02	6.33E-01	2.44E+06
Produktion af gødning P_2O_5	1249500		9.73E+00	2.66E+00	3.21E+06

$^{\Psi}$ Summen af år med tidlig død og år med alvorlig funktionsnedsættelse

Produktionen af den erstattede N og P vil i denne beregning have en samlet omkostning på ca. 13,1 DALY og 5,7 mio. kg CO_2.

FarmtalOnline priser for budgetkalkulerne i 2025, er 10 kr. pr kg N og 16 kr. per kg P. I direkte gødningsomkostninger svarer det årlige tab ved afbrænding med ovenstående antagelser til hhv. 5,1 mio. for N og 8,2 mio. kr. for P.

Samlet set er de direkte omkostninger ved forbrændingen i størrelsen af 100 mio. kr. årligt. Dertil kommer ca. 5,7 mio. kg CO_2 og 13 DALY. Det er ikke muligt at sætte dette i forhold til den formodede sundhedseffekt af at fjerne 0.5 kg $PFAS_{22}$ tilført til dansk landbrugsjord, da denne ikke kendes.

Overvejelser om risiko overfor bæredygtighed

Stillet overfor ovenstående scenarie baseret på PFAS reguleringen af spildevandsslam, er det oplagt at gøre sig nogle overvejelser om risiko overfor bæredygtighed. Det forekommer intuitivt, at der næppe er proportion mellem fordele og ulemper ved afbrændingen af slam, og at beslutningen om reguleringen er truffet 'i kampens hede'. Er der overhovedet nogen gevinst ved afbrændingen, set i forhold til de store direkte omkostninger, klimagasemissioner og tabte DALY's?

Der har været stor medieomtale og frygt i offentligheden, fra start 2020'erne, på et tidspunkt, hvor undersøgelser siden har vist, at den samfundsmæssige eksponering med de målbare PFAS-stoffer var stærkt aftaget (se afsnittet om PFAS i spildevandsslam og blodkoncentrationerne af PFOS og PFOA i den danske befolkning). Det er nærliggende at antage, at det politiske system har haft behov for at vise handlekraft grundet den intense omtale, og man har så valgt bl.a. at fokusere på spildevandsslam, som miljømyndighederne har mulighed for at regulere.

Myndigheder kan vælge at anvende forsigtighedsprincippet som drøftet ovenfor, hvilket indebærer, at mangel på viden om potentielle omkostninger og miljø- og sundhedsmæssige konsekvenser kræver, at de baserer deres beslutninger på worst case-scenarier. Dette vil resultere i en betoning af sikkerhedsforanstaltninger mod de potentielle risici for sundhed og miljø, som myndighederne er usikre på, samtidigt med at de mere fjerne konsekvenser for den miljømæssige bæredygtighed af vores materialestrømme ignoreres.

Hvis vi i fremtiden skal sigte mod mere bæredygtighed i vores ressourceudnyttelse, må der opbygges en kapacitet til at afveje umiddelbar frygt og 'worst-case´ tankegang, mod langsigtede omkostninger for bæredygtighed. Der er brug for at lave et beredskab, der kan hjælpe beslutningstagerne med at lave en '360 graders' vurdering af regulering. Denne kapacitet kan opbygges på forskningsinstitutionerne, eller i rådgivende virksomheder med udgangspunkt i værktøjer, der udvikles i forskningsmiljøer. Der skal bygges modeller som integrerer risikovurdering med bæredygtighedsanalyse, i forhold til specifikke områder – fx samfundets håndtering af bioressourcer.

Vi vil gerne leve trygt og godt, men samtidigt er det vigtigt at have en risikoproportionalitet for øje. En måde at vurdere på kunne være at sammenligne omkostningerne per sparet DALY ved et miljøtiltag, med det vi tilsvarende er villige til at betale for en sparet DALY i forbindelse med trafiksikkerhed.

Sammenfatning

Denne rapport tager udgangspunkt i viden genereret i CRUCIAL forsøget, som repræsenterer den bedre halvdel af danske landbrugsjorde. Det er vigtigt at understrege, at resultaterne ikke kan generaliseres til al dansk landbrugsjord, og slet ikke al landbrugsjord i EU eller i verden. I de kommende år er der brug for at undersøge 'bære-evnen' i svagere jorde. I praksis udbringes spildevandsslam på planteavlsbrug, som i alt overvejende grad ligger på bedre jorde.

CRUCIAL-forsøget viser, at jorden har en bemærkelsesværdig evne til at håndtere og neutralisere uønskede stoffer, og at recirkulering af urbane og animalske restprodukter kan ske uden væsentlig risiko for jordens sundhed.

Forsøget udspringer af en diskussion med repræsentanter fra økologisk landbrug, som spurgte: "Kan vi få næringsstoffer sikkert retur fra byerne?"

Hypotesen var, at nutidens affaldsstrømme er så forbedrede, at recirkulering kan ske uden væsentlig risiko.

For at teste dette, blev der etableret et langvarigt feltforsøg med systematisk tilførsel af urbane og animalske affaldsprodukter — også i ekstreme mængder for at simulere worst-case scenarier.

Forsøgets filosofi bygger på, at stofomsætning i jorden — herunder næringsstoffer, tungmetaller, medicinrester, patogener og gener — skal forstås i et helhedsorienteret perspektiv. Det kræver tværfaglig forskning: biologi, kemi, agronomi, og miljøvidenskab.

CRUCIAL er designet til at opbygge viden over årtier, ikke blot gennem enkeltstående målinger.

Ved at overskride lovlige grænser for gødningstilførsel (f.eks. >200 års fosfortilførsel), testes jordens resiliens og evne til at neutralisere uønskede stoffer.

Siden 2003 har vi derfor systematisk anvendt affaldsmaterialer, såsom husdyrgødning, spildevandsslam og kompost af sorteret organisk affald i både høje og urealistisk høje mængder for at teste jordens modstandsdygtighed og dermed kunne vurdere samlede effekter af uønskede komponenter i affald.

Gennem studier af ændringer af jordens biologiske, fysiske og kemiske kvalitet har følgende konklusioner kunnet drages:

Jordens biologiske kvalitet

Bakteriesamfund

Bakteriesamfundets struktur er generelt robust og stabil over tid.

Gødningstilførsel (slam, kompost, husdyrgødning) medfører kun midlertidige ændringer i resistensprofiler og samfundssammensætning.

Antibiotikaresistens stiger kortvarigt efter tilførsel, men falder hurtigt til grundniveau.

Jorden kan give en meget stærk beskyttelse mod spredning af resistens, og bakteriesamfund i jorden er meget stabile. Det kan samtidigt give noget af forklaringen på, hvorfor vi gennem hundreder af år har levet fint med at tilføre husdyrgødning, som uvægerligt har et meget stort indhold af patogener, til den jord, vi får vores føde fra.

Fødekæder og nematoder

Langvarig anvendelse af kompost, spildevandsslam og animalske affaldsprodukter forbedrer jordens struktur, og kvalitet og øger nematodeaktivitet.

Der blev ikke fundet tegn på toksicitet eller forureningseffekter på nematodesamfundet.

Nematoder trives bedst i jord med højt organisk indhold fra kompost, slam, og husdyrgødning.

Regnorme

Langvarig gødskning med komposteret husholdningsaffald og spildevandsslam havde ingen negative effekter på regnormens vitalitet. Tværtimod kan det høje indhold af organisk materiale i disse gødningstyper forbedre regnormenes trivsel. Mikroplastik i realistiske koncentrationer udgør ikke en umiddelbar trussel, men der er behov for flere studier under naturlige forhold og over længere tid.

I marken blev det fundet at slambehandlinger gav højeste vægt og antal regnorme sammenlignet med andre behandlinger.

Jordens fysiske kvalitet

Organisk gødning (især kompost og slam) øger jordens porøsitet, vandretention og kulstofindhold.

Lavere massefylde og bedre struktur forårsaget af øget kulstofindhold i jorden reducerer energiforbrug ved jordbearbejdning.

Selv om mineralsk gødning kan forbedre visse fysiske og kemiske jordegenskaber og opretholde afgrødeproduktivitet, giver den ikke de samme langsigtede fordele for jordens sundhed som organiske jordforbedringsmidler

Jordens kemiske kvalitet

Human urin gav samme udbytte som NPK og viste høj kvælstofgødningseffekt. Kompost og spildevandsslam forbedrede næringsstofpuljer, og øgede jordens kationombytningskapacitet, men havde lavere udbytte pr. N-enhed. Behandling uden gødning resulterede i markant forringelse af jordens sundhed og produktivitet.

Langvarig tilførsel af spildevandsslam og kompost havde begrænset indvirkning på koncentrationen af potentielt toksiske grundstoffer (tungmetaller) i jord og planter. Selv ved akkumulerede mængder svarende til mere end 100 års lovlig udbringning af spildevandsslam og husholdningskompost, blev der kun observeret en stigning i koncentrationerne af zink (Zn) og molybdæn (Mo). Da disse grundstoffer er essentielle for planter, fremhæver det de potentielle fordele ved at genanvende disse materialer.

Der blev ikke observeret nogen signifikante effekter på koncentrationen af tungmetaller i plantemateriale, bortset fra Cadmium (Cd) i tilfælde af stærkt accelereret udbringning af spildevandsslam svarende til knapt 200 års lovlig anvendelse. Selv i dette tilfælde lå Cd-koncentrationen under de anbefalede grænseværdier for fødevarer og foder.

Mikroplast

Mikroplast findes i alle jordtyper, men niveauerne i CRUCIAL-forsøget er ikke alarmerende.

Ingen negative effekter på jordens organismer er observeret.

Risikoen ved nuværende niveauer vurderes som lav, men der er behov for mere forskning.

PFAS

PFAS findes i jord og grundvand, men koncentrationerne ligger generelt under miljøgrænseværdier, selv ved tilførsel af 200 år dosis på 20 år. PFAS-niveauer i grundvand var 525–1650 gange lavere end teoretisk beregnet ud fra jordkoncentrationer.

Slam fra CRUCIAL har vist faldende PFAS-niveauer over tid. De målbare PFAS var således faldet med en faktor 12 i perioden fra 2003 – 2022.

Organisk stof

Kompost og spildevandsslam bidrager med mere stabilt kulstof, mens kvægmøg fremmer mikrobiel aktivitet og dannelse af mikrobielt afledt organisk stof. Disse forskelle har betydning for jordens frugtbarhed, struktur og evne til at lagre kulstof på lang sigt. Kompost og slam er særligt lovende til langvarig kulstoflagring og kan bidrage til afbødning af klimaeffekter. Stabilisering sker både via kemisk modstandsdygtighed og binding til mineraler.

Risiko ved anvendelse af urbane restprodukter og husdyrgødning

Risiko for jordmiljøet

Slam og husdyrgødning indeholder forskellige uønskede stoffer, men den kumulative risiko er sammenlignelig. Svinegylle udgør højere kronisk risiko pga. Cu og Zn, men regulering har mindsket denne. Organiske kemikalier og medicinrester udgør lav eller ingen risiko for jordorganismer.

Risiko for human sundhed

Tungmetaller som Cd og Pb vurderes at udgøre lav risiko ved korrekt pH-styring og kalkning.

Medicinrester i slam og gylle vurderes ikke at udgøre sundhedsrisiko via planteoptag.

Antibiotikaresistens fra slam er ikke højere end fra husdyrgødning og udgør lav risiko ved korrekt anvendelse.

Alt i alt må det konkluderes at tilsætning af komposteret husholdningsaffald, spildevandsslam og husdyrgødninger har fremmet jordens sundhed.

Hvordan påvirker det vurderingen af recirkulering af samfundets ressourcer?

Vi er overraskede over, hvor robust og resilient jordsystemet har vist sig at være i dette forsøg, og fået øget indsigt i hvor meget jorden hjælper os med håndtering af uønskede affalds- og smitstoffer. Vi har observeret, at tilsætning af komposteret husholdningsaffald og spildevandsslam har resulteret i positive effekter, såsom en stigning i jordens organiske materiale, stigninger i jordens biota på tværs af fødekæden, og øgning af frugtbarheden. Alt i alt har det forbedret jordenes sundhed.

Selvom ikke alle jordtyper kan forventes at udvise en lignende resiliens og evne til at bearbejde uønskede komponenter, som er fundet i CRUCIAL forsøget, mener vi, at der er grund til at påskønne og glæde sig over, at jorden hjælper os i meget høj grad. Vi forstår, at jordtypers relative styrke i denne henseende varierer afhængigt af mineralogi, jordens pH-værdi og indholdet af organisk stof, og vi er nødt til fremover bedre at forstå grænserne for deres evne som 'hjælpere', ikke mindst for jordtyper, der er mindre modstandsdygtige.

Avancerede tekniske affaldsforbrændingsløsninger er nødvendige for håndtering af nogle typer affald, men de er økonomisk dyre og medfører miljømæssige omkostninger, som sjældent tages i betragtning. Der savnes en afvejning af risikoforebyggelse med direkte økonomiske og bæredygtighedsomkostninger

Myndigheder og politikere har brug for hjælp til at afveje risiko versus bæredygtighed, med så meget forsigtighed, som det anses for rimeligt, i betragtning af omkostningerne ved forsigtighed. Dette er et komplekst problem, der kræver input fra forskellige videnskabelige grene og bør være fokus for samordnet tværfaglig forskning i de kommende år, hvor videnskaben om jordens robusthed og resiliens vil være en bidragyder.

Referencer

Boeckmann, M., Siemens, J., Heyde, B.J., Zarfl, C., 2025. Identification of dissipation pathways for pharmaceuticals in soils - a modelling approach. Environmental Science: Processes and Impacts 27, 649–660. doi:10.1039/d4em00777h

Brokbartold, M., Grupe, M., Marschner, B., 2012. Effectiveness of different soil amendments to reduce the Pb and Zn extractability and plant uptake in soils contaminated by anticorrosion paints beneath pylons. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 175, 443–455. doi:10.1002/jpln.201100198

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018. Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry 120, 105–125. doi:10.1016/j.soilbio.2018.01.030

Claßen, D., Siedt, M., Nguyen, K.T., Ackermann, J., Schaeffer, A., 2019. Formation, classification and identification of non-extractable residues of 14C-labelled ionic compounds in soil. Chemosphere 232, 164–170. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.05.038

Draborg H, T.K., 2023. Undersøgelser af CRUCIAL forsøget for PFAS påvirkning fra spildevandsslam.

Klemmensen, et al. 2023. Forskning og vidensdannelse omkring mikroplastik i spildevandsslam udspredt på landbrugsjorde. Miljøstyrelsen. ISBN: 978-87-7038-496-4

Gennemførelse og anvendelse af slamdirektivet Afrapportering 2024, Redaktion Hauschildt C, og Nistrup Jørgensen P. Miljøstyrelsen 2025, ISBN: 978-87-7564-045-4

Halling-Sørensen, B., Jacobsen, A.M., Jensen, J., Sengeløv, G., Vaclavik, E., Ingerslev, F., 2005. Dissipation and effects of chlortetracycline and tylosin in two agricultural soils: A field-scale study in southern Denmark. Environmental Toxicology and Chemistry 24. doi:10.1897/03-576.1

Harmsen, J., Hennecke, D., Hund-Rinke, K., Lahr, J., Deneer, J., n.d. Risk Assessment of Soils containing Non-Extractable Residues (NER).

Hennecke, D., Kruse, M., Bräutigam, J., Meisterjahn, B., Klein, J., Claßen, D., Trapp, S., Kästner, M., Brock, A.L., Schäffer, A., 2023. Silylation: a reproducible method for characterization of non-extractable residues (NER) of organic chemicals in the assessment of persistence. Environmental Science: Advances 2, 424–432. doi:10.1039/d2va00314g

Hull, S.D., Deen, L., Petersen, K.U., Jensen, T.K., Hammer, P., Wils, R.S., Frankel, H.N., Ostrowski, S.R., Tøttenborg, S.S., 2023. Time trends in per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) concentrations in the Danish population: A review based on published and newly analyzed data. Environmental Research 237. doi:10.1016/j.envres.2023.117036

Jensen, J., Jepsen, S.E., 2005. The production, use and quality of sewage sludge in Denmark. Waste Management 25, 239–247. doi:10.1016/j.wasman.2004.08.011

Jensen J, Fauser P et al. 2023. Derivation of cut-off values for PFAS in sewage sludge. The Danish Environmental Protection Agency, ISBN: 978-87-7038-497-1

Jespersen, C., Trapp, S., Kästner, M., 2024. Non-extractable residues (NER) in persistence assessment: effect on the degradation half-life of chemicals. Environmental Sciences Europe 36. doi:10.1186/s12302-024-01025-1

Johansen, J.L., Dam, M., Kudjordjie, E.N., Santos, S.S., Palmqvist, A., Magid, J., Vestergård, M., 2023. Effects of long-term fertilization with contemporary Danish human urine, composted household waste and sewage sludge on soil nematode abundance and community structure. Science of the Total Environment 860. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160485

Johansen, J.L., Magid, J., Vestergård, M., Palmqvist, A., 2024. Extent and effects of microplastic pollution

in soil with focus on recycling of sewage sludge and composted household waste and experiences from the long-term field experiment CRUCIAL. TrAC - Trends in Analytical Chemistry. doi:10.1016/j.trac.2023.117474

Kästner, M., Nowak, K.M., Miltner, A., Trapp, S., Schäffer, A., 2014. Classification and modelling of nonextractable residue (NER) formation of xenobiotics in soil - A synthesis. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. doi:10.1080/10643389.2013.828270

Lassen, C., Maag, J., Krag, A., Dau, M.S., et .al. 2024. Substance flow analysis of PFASs inDenmark Publisher: Ministry of Environment of Denmark

Lee, S.H., Lee, J.S., Jeong Choi, Y., Kim, J.G., 2009. In situ stabilization of cadmium-, lead-, and zinc-contaminated soil using various amendments. Chemosphere 77, 1069–1075. doi:10.1016/j.chemosphere.2009.08.056

Lennartz, S., Byrne, H.A., Kümmel, S., Krauss, M., Nowak, K.M., 2024. Hydrogen isotope labeling unravels origin of soil-bound organic contaminant residues in biodegradability testing. Nature Communications 15. doi:10.1038/s41467-024-53478-w

Loeffler, D., Hatz, A., Albrecht, D., Fligg, M., Hogeback, J., Ternes, T.A., 2020. Determination of non-extractable residues in soils: Towards a standardised approach. Environmental Pollution 259. doi:10.1016/j.envpol.2019.113826

Löffler, D., Martin, A., Albrecht, D., Fligg, M., Hogeback, J., n.d. Global approach (Part A): Are substances more persistent than test systems lead to believe? Non-extractable residues: experimental examination of suitable extraction methods in view of a long-term risk for the environment On behalf of the German Environment Agency Final Report.

López-Rayo, S., Laursen, K.H., Lekfeldt, J.D.S.S., Delle Grazie, F., Magid, J., Lopez-Rayo, S., Laursen, K.H., Lekfeldt, J.D.S.S., Delle Grazie, F., Magid, J., 2016. Long-term amendment of urban and animal wastes equivalent to more than 100 years of application had minimal effect on plant uptake of potentially toxic elements. Agriculture, Ecosystems and Environment 231, 44–53. doi:10.1016/j.agee.2016.06.019

Magid, J., Jandl, G., Müller-Stöver, D.S., Leinweber, P.K., 2025. The effect of long-term, extremely high organic fertilization on the composition of soil organic matter. Soil and Tillage Research 253. doi:10.1016/j.still.2025.106661

Magid, J., Pedersen, K.E., Hansen, M., Cedergreen, N., Brandt, K.K., 2020. Comparative assessment of the risks associated with use of manure and sewage sludge in Danish agriculture, in: Advances in Agronomy. Academic Press Inc., pp. 289–334. doi:10.1016/bs.agron.2020.06.006

Magid, J Pedersen, KE Hansen, M Cedergreen, N.B.K., 2020. Comparative assessment of the risks associated with use of manure and sewage sludge in Danish agriculture. Advances in Agronomy - ADVAN AGRON 162, in press.

McGrath, S.P., 1984. Metal concentrations in sludges and soil from a long-term field trial. The Journal of Agricultural Science 103, 25–35. doi:10.1017/S002185960004329X

Musovic, S., Klümper, U., Dechesne, A., Magid, J., Smets, B.F., 2014. Long-term manure exposure increases soil bacterial community potential for plasmid uptake. Environmental Microbiology Reports 6, 125–130. doi:10.1111/1758-2229.12138

Nziguheba, G., Smolders, E., 2008. Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries. Science of the Total Environment 390, 53–57. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.09.031

Palmqvist, A., Hamann Sandgaard, M., Magid, J., n.d. MIKROPLAST I JORD Undersøgelse af langtidseffekter og undvigeadfaerd hos den naturligt forekommende, endogaeiske regnormeart Aporrectodea caliginosa.

Pedersen, KE; Brandt, KK; Hansen, M Cedergreen, N; Magid, J., 2019. Assessment of risks related to agricultural use of sewage sludge, pig and cattle slurry. Copenhagen.

Peltre, C., Gregorich, E.G., Bruun, S., Jensen, L.S., Magid, J., 2017. Repeated application of organic waste affects soil organic matter composition: Evidence from thermal analysis, FTIR-PAS, amino sugars and lignin biomarkers.

Soil Biology & Biochemistry 104, 117–127. doi:10.1016/j.soilbio.2016.10.016

Peltre, C., Nyord, T., Bruun, S., Jensen, L.S., Magid, J., 2015. Repeated soil application of organic waste amendments reduces draught force and fuel consumption for soil tillage. AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT 211, 94–101. doi:10.1016/j.agee.2015.06.004

Poulsen, Pernille H B, Al-Soud, W.A., Bergmark, L., Magid, J., Hansen, L.H., Soerensen, S.J., 2013. Effects of fertilization with urban and agricultural organic wastes in a field trial: Prokaryotic diversity investigated by pyrosequencing. Soil Biology and Biochemistry 57, 784–793.

Poulsen, Pernille Hasse Busk, Magid, J., Luxhøi, J., de Neergaard, A., 2013. Effects of fertilization with urban and agricultural organic wastes in a field trial-Waste imprint on soil microbial activity. Soil Biology and Biochemistry 57, 794–802. doi:10.1016/j.soilbio.2012.02.031

Riber, L., Poulsen, P.H.B., Al-Soud, W.A., Skov Hansen, L.B., Bergmark, L., Brejnrod, A., Norman, A., Hansen, L.H., Magid, J., Sørensen, S.J., 2014. Exploring the immediate and long-term impact on bacterial communities in soil amended with animal and urban organic waste fertilizers using pyrosequencing and screening for horizontal transfer of antibiotic resistance. FEMS Microbiology Ecology 90, 206–224. doi:10.1111/1574-6941.12403

Schnitzler, F., Junge, T., Dorn, S., n.d. Interactions Between Chemicals and Soil Organic Matter [3] Binding Forms & NER Characterisation [4] Part I: Non-Extractable Residues (NER) in Soil-Review and Definitions.

Smolders, E., 2013. REVISITING AND UPDATING THE EFFECT OF PHOSPHORUS FERTILISERS ON CADMIUM ACCUMULATION IN EUROPEAN AGRICULTURAL SOILS, in: Proceedings 724. International Fertilizer Society, Windsor, pp. 1–33.

Smolders, E., Oorts, K., Van Sprang, P., Schoeters, I., Janssen, C.R., McGrath, S.P., McLaughlin, M.J., 2009. Toxicity of trace metals in soil as affected by soil type and aging after contamination: Using calibrated bioavailability models to set ecological soil standards. Environmental Toxicology and Chemistry 28, 1633–1642. doi:10.1897/08-592.1

Spohn, M., Diáková, K., Aburto, F., Doetterl, S., Borovec, J., 2022. Sorption and desorption of organic matter in soils as affected by phosphate. Geoderma 405. doi:10.1016/j.geoderma.2021.115377

Vuaille, J., Gravert, T.K.O., Magid, J., Hansen, M., Cedergreen, N., 2022. Long-term fertilization with urban and animal wastes enhances soil quality but introduces pharmaceuticals and personal care products. Agronomy for Sustainable Development 42. doi:10.1007/s13593-021-00726-8

PhD projekter, specialer og rapporter

PhD projekter

Pernille Hasse Busk Poulsen.

Examination of Microbial Diversity and Function in waste amended soils and chitin amended compost. University of Copenhagen, Faculty of Life Sciences, Plant and Environmental Science, 2010

Jonas Duus Stevens Lekfeldt.

Urban waste effects on soil quality - results from the CRUCIAL field trial. University of Copenhagen, Faculty of Science, Plant and Environmental Science, 2015

Marie Reimer.

Towards a sustainable nutrient management in organic farming Closing the nutrient gap with recycled fertilizers from urban waste. Faculty of Agricultural Sciences University of Hohenheim, 2022

Mario Alejandro Alvarez Salas

OVERCOMING CHALLENGES IN NUTRIENT RECYCLING: IMPACTS OF LONG-TERM FERTILIZATION WITH ORGANIC MATERIALS ON SOIL PHOSPHORUS CYCLING. ETH Zürich, 2024

Specialer

Signe Lange. (Resultater fra CRUCIAL forsøget 2003-2014)

The Fertilizer Value of Farm Animal Manure and Urban Organic Waste, Nitrogen Balances, Accumulation of Nitrogen and Organic Matter in the Topsoil, and the Residual Effect on Crop Yield. MSc Thesis. Department of Plant and Environmental Science, Copenhagen University 2016

Nadja Diana Karling

Investigating the effects of different fertilizing treatments on earthworms. - View on potential impacts of microplastic. MSc thesis Department of Science and Environment Roskilde University 2018

Rapporter

Liensgaard Johansen, J., Magid, J., Vestergård, M., Palmqvist, A., 2022. Omfang og effekter af mikroplast forurening i jord - med særligt fokus pa recirkulering af affaldsprodukter. Copenhagen.

Palmqvist, A., Sandgaard, M. H., & Magid, J. (2019). *Mikroplast i jord - Undersøgelse af langtidseffekter og undvigeadfærd hos den naturligt forekommende, endogæiske regnormeart Aporrectodea caliginosa*. Roskilde Universitet.

Pedersen, KE; Brandt, KK; Hansen, M Cedergreen, N; Magid, J., 2019. Assessment of risks related to agricultural use of sewage sludge, pig and cattle slurry. Copenhagen.

Oversigt over videnskabelige publikationer med CRUCIAL som det centrale forskningsobjekt

Magid J, Luxhoi J, Jensen LS, et al. (2006) Establishment of a long-term field trial with urban fertilizers – is recycling of nutrients from urban areas to peri-urban organic farms feasible? In: Raupp J, Pekrun C, Oltmanns M, Köpke U (eds), Long-term Field Experiments in Organic Farming. Verlag Dr. Köster, pp. 59–78

Establishes the CRUCIAL experiment to assess the feasibility of recycling urban nutrients in peri-urban organic agriculture.

Poulsen PHB, Magid J, Luxhoi J, de Neergaard A. (2013) *Effects of fertilization with urban and agricultural organic wastes in a field trial: Waste imprint on soil microbial activity.* Soil Biology & Biochemistry, 57:794–802 DOI

Fertilization with high doses of urban wastes did not negatively impact soil microbial activity.

Poulsen PHB, Al-Soud WA, Bergmark L, et al. (2013) Effects of fertilization with urban and agricultural organic wastes in a field trial: Prokaryotic diversity investigated by pyrosequencing. Soil Biology & Biochemistry, 57:784–793

Prokaryotic diversity in soil remains robust under different organic waste fertilization treatments.

Musovic S, Klumper U, Dechesne A, et al. (2014) Long-term manure exposure increases soil bacterial community potential for plasmid uptake. Environmental Microbiology Reports

Long-term manure exposure increases the potential of soil bacterial communities to acquire plasmids.

Riber L, Poulsen PHB, Al-Soud WA, et al. (2014) Exploring the immediate and long-term impact on bacterial communities in soil amended with animal and urban organic waste fertilizers using pyrosequencing and screening for horizontal transfer of antibiotic resistance. FEMS Microbiology Ecology, 90:206–224 DOI

Organic amendments affect bacterial community structure, but no significant increase in horizontal antibiotic resistance transfer was observed.

Lekfeldt JDS, Magid J, Holm PE, et al. (2014) Evaluation of the leucine incorporation technique for detection of pollution-induced community tolerance to copper in a long-term agricultural field trial with urban waste fertilizers. Environmental Pollution, 194:78–85 DOI

The leucine incorporation technique detects increased microbial community tolerance to copper in soils fertilized with urban waste.

Peltre C, Nyord T, Bruun S, et al. (2015)
Repeated soil application of organic waste amendments reduces draught force and fuel consumption for soil tillage. Agriculture, Ecosystems & Environment, 211:94–101
DOI

Repeated application of organic waste reduces draft force and fuel consumption during soil tillage.

López-Rayo S, Laursen KH, Lekfeldt JDSS, et al. (2016)
Long-term amendment of urban and animal wastes equivalent to more than 100 years of application had minimal effect on plant uptake of potentially toxic elements. Agriculture, Ecosystems & Environment, 231:44–53
DOI

Long-term amendments with urban and animal wastes do not significantly increase plant uptake of potentially toxic elements.

Gómez-Muñoz B, Magid J, Jensen LS. (2017)
Nitrogen turnover, crop use efficiency and soil fertility in a long-term field experiment amended with different qualities of urban and agricultural waste. Agriculture, Ecosystems & Environment
DOI

The quality of organic waste influences nitrogen use efficiency and soil fertility.

Lekfeldt JDS, Holm PE, Kjærgaard C, Magid J. (2017)
Heavy Metal Leaching as Affected by Long-Time Organic Waste Fertilizer Application. Journal of Environmental Quality
DOI

Long-term application of organic fertilizers may increase heavy metal leaching in soil.

Peltre C, Gregorich EG, Bruun S, et al. (2017)
Repeated application of organic waste affects soil organic matter composition: Evidence from thermal analysis, FTIR-PAS, amino sugars, and lignin biomarkers. Soil Biology & Biochemistry, 104:117–127
DOI

Organic waste types alter soil organic matter composition distinctively, affecting its stability and speciation.

Lekfeldt JDS, Kjaergaard C, Magid J. (2017)
Long-term Effects of Organic Waste Fertilizers on Soil Structure, Tracer Transport, and Leaching of Colloids. Journal of Environmental Quality, 46:862–870
DOI

Long-term organic waste fertilizers improve soil structure and reduce colloid leaching.

Lemming C, Oberson A, Magid J, et al. (2019)
Residual phosphorus availability after long-term soil application of organic waste.
Agriculture, Ecosystems & Environment, 270–271:65–75
DOI

The plant availability of surplus (residual) phosphorus in soils is different depending on the organic waste treatment.

Glæsner N, van der Bom F, Bruun S, et al. (2019)
Phosphorus characterization and plant availability in soil profiles after long-term urban waste application.
Geoderma, 338:136–144
DOI

Long-term urban waste application increases phosphorus availability in the soil profile, especially with sewage sludge.

Vuaille, J., Gravert, T. K. O., Magid, J., Hansen, M., & Cedergreen, N. (2022). Long-term fertilization with urban and animal wastes enhances soil quality but introduces pharmaceuticals and personal care products. Agronomy for Sustainable Development, 42(1)
DOI

Fertilization with urban and animal wastes enhances soil quality but introduces pharmaceuticals and personal care products.

Johansen, J. L., Dam, M., Kudjordjie, E. N., Santos, S. S., Palmqvist, A., Magid J., & Vestergård M. (2023)
Effects of long-term fertilization with contemporary Danish human urine, composted household waste, and sewage sludge on soil nematode abundance and community structure.Science of the Total Environment, 860
DOI

Long-term fertilization with human urine, composted household waste, and sewage sludge affects soil nematode abundance and community structure.

Johansen JL, Magid J, Vestergård M, Palmqvist A. (2024)
Extent and effects of microplastic pollution in soil with a focus on recycling sewage sludge and composted household waste, experiences from the long-term field experiment CRUCIAL. Journal of Analytical Chemistry
DOI

Application of sewage sludge and composted household waste introduces microplastics into soil, affecting its quality and health.

Bünemann, E. K., Reimer, M., Smolders, E., Smith, S. R., Bigalke, M., Palmqvist, A., Brandt, K. K., Möller, K., Harder, R., Hermann, L., Speiser, B., Oudshoorn, F., Løes, A. K., & Magid, J. (2024). *Do contaminants compromise the use of recycled nutrients in organic agriculture? A review and synthesis of current knowledge on contaminant concentrations, fate in the environment and risk assessment.* Science of The Total Environment, 912, 168901.
DOI

Contaminants in recycled nutrients may compromise their use in organic agriculture, depending on their concentration and environmental fate.

Pappoe, A. N. A., Fekiacova-Castanet, Z., Guihou, A., Bosch-Serra, À. D., Deschamps, P., Feder, F., Magid, J., Morvan, T., Testemale, D., & Doelsch, E. (2024). *Stable isotopes analysis combined with X-ray absorption spectroscopy reveal the fate of organic waste-borne copper and zinc in amended soils. Journal of Hazardous Materials,* 480, 136039.
DOI

Stable isotope analysis and X-ray absorption spectroscopy show that copper and zinc from organic waste accumulate in soil, with ecosystem health implications.

Reimer, M; Möller, K; Magid, J, Bruun, S. (2025) Urban waste fertilizer: effects on yield, nutrient dynamics and potentially toxic element accumulation. Nutrient Cycling in Agroecosystems
DOI

Urban waste fertilizers affect crop yield, nutrient dynamics, and accumulation of potentially toxic elements in soil.

Magid, J; Jandl, G; Müller-Stöver, D; Leinweber, P (2025) The effect of long-term, extremely high organic fertilization on the composition of soil organic matter. Soil and TIlage Research 253
DOI

Soil organic matter (SOM) composition is influenced by the input of organic materials. Organic inputs unequally enriched SOM in lignin dimers, lipids and free fatty acids.

Álvarez Salas, M; Magid, J; Müller-Stóver, D; Gómez-Muñoz, B; Tamburini, F; Oberson Dräyer, A (2025) Limited impact of organic fertilizers on soil phosphorus accumulation in a long-term field experiment with excess fertilization. Geoderma
DOI

Excess P application from different organic fertilizers result in different amounts of lost P from the topsoil.



BRANCHEFORENINGEN
GENANVEND BIOMASSE
affald til ressource