

Fosfor i planter - ressource og miljøfaktor

Studier har vist, at planternes fosfatlager kan anvendes som erstatning for råfosfat, udvundet fra miner, til gavn for både miljøet og for forvaltningen af verdens begrænsede fosfatressourcer.

*Henrik Brinch-Pedersen, seniorforsker
Danmarks JordbrugsForskning, Afdeling for Genetik og Bioteknologi,
Forskningscenter Flakkebjerg, 4200 Slagelse*

Introduktion

Vigtigheden af at forstå planternes fosformetabolisme rækker langt ud over det rent akademisk interessante. Planternes frø oplagrer meget store mængder fosfor (P), der nu og i fremtiden udgør en vigtig ressource i forhold til miljøet og i forvaltningen af verdens fosfatreserver. Uorganisk fosfat bruges i dag i store mængder som en vigtig bestanddel af mineralisk gødning og som fodertilsætningsstof (se senere). Presset på verdens fosfatressourcer stiger som følge af den stærke vækst i lande som Kina og Indien, og fordi det som led i bekæmpelsen af sygdommen BSE er blevet forbudt at anvende det fosfatrige kød- og benmæl som fodertilsætningsstof. Interessen for en effektiv forvaltning af verdens P ressourcer vil i fremtiden stige yderligere, idet fosfat af god kvalitet, udvundet som et relativt billigt råstof fra miner, vurderes til at være opbrugt om ca. 50 år (Figur 1). Fosfat af dårlig kvalitet vil bl.a. sige med et forhøjet indhold af tungmetaller.

Fosfor i planter

Plantens fosfor oplagres i form af fytinsyre også kaldet fytat. I selve planten eksisterer fytaten som et blandet salt af fx Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} og Zn^{2+} og benævnes fytin. Af den totale P i plantens frø eksisterer ~75% som fytinsyre (Figur 1), ~5% optræder som uorganisk P og de resterende ~20% indgår i alle andre former som f. eks DNA, RNA, protein, stivelse og fedtstoffer. Fytinsyren udgør op til flere procent af frøets tørvægt, i kornarterne op til 2-3%. Ud af 100 g tørre kornkerner vil de 2-3 g altså være fytinsyre. Fytinsyrefosfor udgør således en betydelig ressource og i år 2000 blev den samlede globale produktion af plantefytinsyre estimeret til at udgøre mere end 51 millioner tons, hvilket svarer til næsten 65% af alt P solgt verden over som mineralisk gødning.

Hos planten fungerer fytinsyre først og fremmest som en lagerforbindelse, der først tages i brug i forbindelse med spiring af det modne frø. Under frøets spiring forsynes den fremvoksende plante med fosfat, frigjort fra fytin-

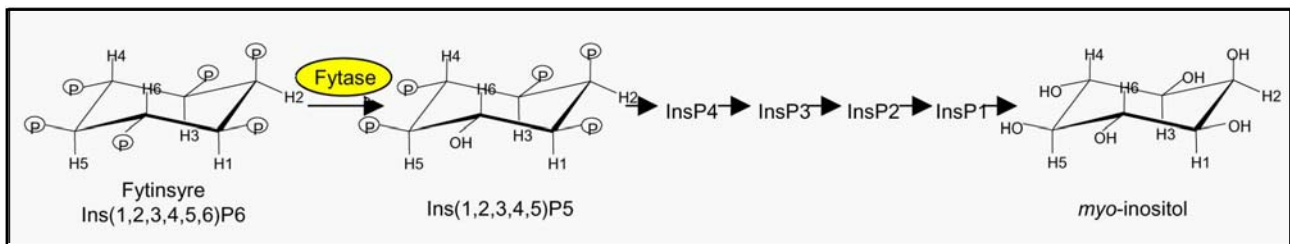


Figur 1. Råfosfat knuses før udvinding. Foto: Florida Institute of Phosphate Research

syre af enzymet fytase (Figur 2). I modne ikke spirende kerner findes kun en meget begrænset fytaseaktivitet men i løbet af spiringsprocessen øges fytaseaktiviteten dramatisk så fosfor oplagret i fytinsyre kan frigøres og anvendes af den fremspirende plante.

Plantefosfor i ernæring og miljø

I Danmark anvendes den dyrkede mængde korn fortrinsvis til fodring af grise og fjerkræ (Figur 3). Af de 4560.000 tons hvede, der blev produceret i 2003, blev de 3136.000 tons anvendt til foder, svarende til 69% af den samlede produktion. Med den megen foderkorn tilføres der meget store mængder fosfor i form af fytinsyre. Da dyrenes fordøjelsessystem og altså også de modne kerner kun har meget begrænset fytaseaktivitet, er tilgængeligheden (biotilgængeligheden) af fytinsyrefosfaten derfor meget lille. For at dyrene kan opnå den mængde fosfor, de behøver under deres vækst, tilføres i stedet biotilgængeligt fosfor i form af fortrinsvis mono-calcium fosfat (MCP). Udover, at der via MCP tilsætningerne gøres et betydeligt indhug i verdens fosfatreserver, passerer der altså store mængder ufordøjet fytinsyrefosfat igennem dyret, der efter spredning af husdyrgødning på markerne, udgør en belastning af miljøet. Belastningen af landbrugsjorden med ufordøjet fosfor har i mange år været intens, men udviklingen søges



Figur 2. Fytinsyre består af en ringformet struktur af seks kulstofatomer med en fosfatgruppe og et brint på hver. Fytase fraspalter fosfatgrupperne og erstatter dem med en OH gruppe. Fosfat frigøres trinvist, og når alle fosfatgrupper er spaltet fra, er der kun grundstrukturen *myo*-inositol tilbage.

Planten optager fosfat fra jordvæsken som dihydrogenfosfat ($H_2PO_4^-$) eller hydrogenfosfat (HPO_4^{2-}). Ionerne skal være opløst i jordvæsken, for at planterne kan optage dem. Indholdet af fosfor i foder eller gødning oplyses som mængden af grundstoffet P, uanset hvilken form fosforet findes i. Grundstoffet P har molekylvægten 30,97 g/mol. Dihydrogenfosfat ($H_2PO_4^-$) vejer 96,97 g/mol.

Fytinsyres molekylvægt er 660,08 g/mol. Syreegenskaberne skyldes at fosfatgrupperne kan fraspaltes den ene eller begge brintioner. I stedet kan forskellige kationer (fx K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} og Zn^{2+}) bindes til fosfatgrupperne. Når disse ioner er bundet til fytinsyren betegnes forbindelsen kemisk set fytin. Molekylvægten af fytin afhænger af hvilke ioner, der indgår i forbindelsen.

Der findes forskellige typer fytase, og de grupperes efter hvilken fosfatgruppe, de fraspalter først. 6-fytaser, fraspalter først den fosfatgruppe, der sidder på kulstofatom nummer 6, mens 3-fytase først fraspalter fosfatgruppen på kulstofatom nummer 3. Når begge typer enzymer er tilstede samtidigt, opnås en meget effektiv nedbrydning af fytinsyren.

nu vendt via virkemidlerne vedtaget under vandmiljøplan III (VMPIII). Dette indebærer blandt andet indførelsen af en afgift på 4 kr. per kg foderfosfor med virkning fra 1. april 2005. For en detaljeret beskrivelse omkring fosfor i dansk landbrug se endvidere http://www.vmp3.dk/Files/Filer/Rap_fra_t_grupper/fosfor-i-dansk-landbrug-okober-2003.pdf

Udover at binde store mængder fosfor har fytinsyre også den ulempe, at den binder næringsmæssige vigtige mineraler som f. eks. jern og zink, så de er utilgængelige i ernæringssammenhæng. Dette er især et problem i den tredje verden, hvor mere end to milliarder mennesker lider under mangel på jern og zink, da de lever på en ensartet kost baseret på fortrinsvis ris. En forbedret fytinsyre nedbrydning vil også øge mineraltilgængeligheden.

Hvordan løses fytinsyreproblemet?

Med plantens frø som den centrale komponent i alt foder indtager planteforskningen en nøglerolle i løsningen af fytinsyreproblemet. Et primært mål er at forbedre biotilgængeligheden af plantens fytinsyrefosfor. En effektiv udnyttelse af plantens eget fosfatlager vil betyde, at MCP tilsætningen kan reduceres eller helt udelukkes. Den umiddelbare miljøgevinst er, at husdyrgødningen (gyllen) vil indeholde mindre fosfor, idet en større del af den fytinbundne fosfor bliver udnyttet af dyret. På lang sigt vil en reduktion af MCP forbruget endvidere have en positiv betydning for forvaltningen af verdens fosfatreserver.

En nøgle til forbedret biotilgængelighed af fytinsyrefosfor er at øge fytaseaktiviteten i dyrenes fordøjelsessystem. Blandt de mere eksotiske løsningsforslag, der kan udføres, men som næppe er realiserbart i stor skala, er gensplejsning af dyrene, så de får højere fytaseaktivitet i deres fordøjelsessystem.

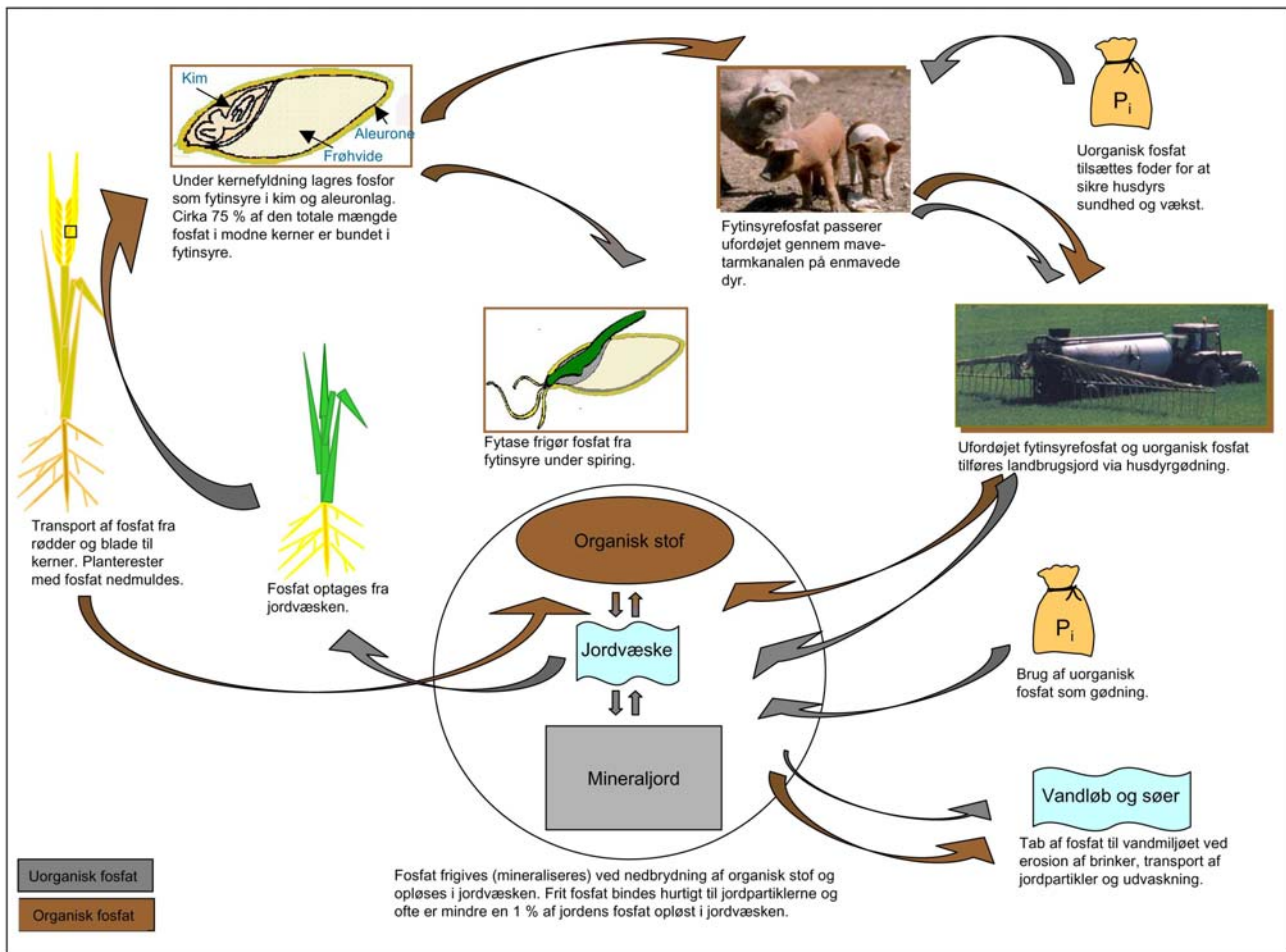
En anden metode, der har vist sig meget effektiv, er at sikre et højere fytaseniveau i det anvendte foder. En gam-

melkendt og lavteknologisk løsning til opnåelse af mere fytase er at sætte kernerne i støb, inden de anvendes til foder. At sætte i støb vil sige, at der tilsættes vand til kernerne, som derefter inkuberes, så spiringen starter, og der bliver dannet ekstra fytaseaktivitet. Metoden er vanskelig at styre, så man ved til hvilket niveau af fytaseaktivitet, der opnås under spiringsprocessen. Samtidig er der under inkubationen fare for opformering af bakterier og svampe, der har negativ indflydelse på dyrenes trivsel.

En tredje løsning er at iblande ekstra fytase i foderet. Fytase er i dag kommercielt tilgængeligt og fremstilles i store mængder via fermentering i den bioteknologiske industri. Metoden anvendes med succes og gør, at tilsætningen af MCP kan reduceres betragtelig.

Hvad kan vi gøre indenfor planteforskningen

I forlængelse af de gode resultater opnået med tilsætning af ekstra fytase til foderet er planteforskningen gået et skridt videre og har i de senere års forskning vist, at den ønskelige ekstra fytaseaktivitet kan laves, mens frøene udvikles. Udover en reduktion af MCP forbruget og miljøgevinsten, som er den samme som ved tilsætning af mikrobiel fremstillet fytase, er det en yderligere fordel, at der ikke skal indkøbes fytase til iblanding i foderet. Samtidigt er produktionen gratis, idet landmanden blot skal så og høste, som han plejer med den bonus, at hans afgrøder nu også har den nødvendige fytase. Flere forsøg har endvidere vist, at det er muligt at lave så store mængder fytase i frøet, at planterne kan fungere som produktionsenheder. Sådanne afgrøder vil kunne dyrkes meget billigt, og høsten forhandles som fytasetilsætningsstof. Den ekstra fytaseaktivitet opnås ved at indsætte ekstra fytasegener, så der laves mere fytase under frøets udvikling end normalt. De anvendte gener kan være de samme, som allerede anvendes til industriel fremstilling af fytase, eller der kan an-



Figur 3. Fosfor i landbrugets og naturens økosystem. Uorganisk fosfor optages af plantens rødder og transporteres til blade og kerner. Kun begrænsede mængder af jordens fosfat er dog tilgængeligt for planterne, idet mobiliteten af fosfor i jord er meget ringe. I naturlige økosystemer returneres fosfaten direkte til jorden, når planten dør. I intensiv planteavl tilføres store mængder ekstra fosforgødning til jorden, og plantens frø anvendes i stor udstrækning til foder. I særdeleshed de enmavede dyr (fx grise og kyllinger) er desværre meget dårlige til at udnytte de store mængder fosfat, der findes i frøet, og den returneres derfor via spredning af husdyrgødning til jorden. Som konsekvens heraf tilføres ofte et betydeligt overskud af fosfat til jorden. Det overskydende fosfat akkumuleres i jorden og kan sidenhen udledes til belastning for vandmiljøet.

vendes plantens egne gener, således at der blot indsættes ekstra kopier, der medfører et højere niveau af fytase. Metoden har vist sig effektiv i adskillige plantearter, og fodringsforsøg har vist, at MCP tilsætningen kan reduceres eller helt udelades, samt at udledningen af ufordøjet fosfat reduceres betragteligt (op til ca. 50%). Hos Danmarks JordbrugsForskning, Forskningscenter Flakkebjerg har vi fremstillet hvede og byg, der indeholder store mængder fytase i de modne kerner. Den ekstra fytase bliver produceret specifikt i de udviklende kerner og er i stand til at nedbryde kernens fytinsyre meget effektivt. Udover den ekstra fytase ligner planterne deres ikke gensplejsede søskende, og vi har endvidere undersøgt, om syntesen af den ekstra fytase påvirker udtrykket af plantens andre gener, men har ikke kunnet finde nogle forskelle.

En vigtig egenskab ved fytase, der skal indgå i foder eller humanernæring, er, om fytasen er varmemestabil. Fytasen skal kunne modstå de temperaturer, der opnås under tilberedning af et måltid eller under fremstilling af foder: I forbindelse med human ernæring skal fytasen kunne

modstå en længere kogeperiode, og i fodersammenhæng til opvarmning til mere end ca. 80°C, der anvendes for blandt andet at forhindre *samonella* infektioner hos dyrene, der skal spise foderet. Det er for nyligt lykkedes os at fremstille hvede, hvor kerner eller mel, kogt i op til 20 minutter, stadig har fytaseaktivitet til at kunne nedbryde betydelige mængder fytinsyre. En sådan plante vil have stor betydning i både human og animal ernæring.

En anden strategi til forbedring af plantefosfatens biotilgængelighed er at ændre på frøets fosfatsammensætning, så indholdet af fytinsyre bliver reduceret og indholdet af uorganisk fosfat stiger. En sådan fordeling er fordelagtigt da den organiske fosfor i modsætning til fytinsyre er biotilgængelig for enmavede dyr. Det er lykkedes via kemisk og fysisk induceret mutation at fremstille sådanne planter og fodringsforsøg har da også vist at udledningen af ufordøjet fosfor kan reduceres med 40 til 50%. Desværre har plantelinierne et lavere udbytte samt en stærkt reduceret fremspiringen efter udsåning i marken.

Konklusion

Set i lyset af udviklingen i verdens fosfatressourcer og de miljø- og ernæringsmæssige problemer, der er forbundet med ringe udnyttelse af fosfor i foder og fødevarer, står det klart at en forbedret udnyttelse af plantens fosfatressourcer er en absolut nødvendighed. Planteforskningen spiller i den forbindelse en helt central rolle, og de første skridt med blandt andet øget fytaseaktivitet i kornkernen er taget. Fremtiden vil dog stille yderligere krav til forståelsen af plantens fosfatmetabolisme for på sigt at kunne undvære fosfattilsætning til foder fuldkomment.