

## Fosfor i dansk landbrug

Omsætning, tab og virkemidler mod tab

Hanne Damgaard Poulsen & Gitte Holton Rubæk (red.)



# Fosfor i dansk landbrug

## Omsætning, tab og virkemidler mod tab

### Hanne Damgaard Poulsen

Afdeling for Husdyrsundhed, Velfærd og Ernæring  
Danmarks JordbrugsForskning  
Blichers Allé  
Postboks 50  
8830 Tjele

### Gitte Holton Rubæk

Afdeling for Jordbrugsproduktion og Miljø  
Danmarks JordbrugsForskning  
Blichers Allé  
Postboks 50  
8830 Tjele

DJF rapporter indeholder hovedsagelig forskningsresultater og forsøgsopgørelser rettet mod danske forhold. Endvidere kan rapporterne beskrive større samlede forskningsprojekter eller fungere som bilag til temamøder. DJF rapporter udkommer i serierne: Markbrug, Husdyrbrug og Havebrug.

Pris:

Pris pr. stk. DKK 150,-

Abonnenter opnår 25% rabat, og abonnement kan tegnes ved henvendelse til:

Danmarks JordbrugsForskning  
Postboks 50, 8830 Tjele  
Tlf. 8999 1028

Alle DJF's publikationer kan bestilles på nettet:  
[www.agrsci.dk](http://www.agrsci.dk)

Tryk: [www.digisource.dk](http://www.digisource.dk)

ISSN 1397-9892

## FORORD

I forbindelse med forarbejdet til Vandmiljøplan III (VMPIII) blev der nedsat en teknisk arbejdsgruppe, som fik til opgave at beskrive det aktuelle forbrug, omsætning og udnyttelse af fosfor i dansk landbrug. Samtidig fik arbejdsgruppen til opgave at beskrive A) mulighederne for gennem fodringsmæssige tiltag at begrænse fosfortilførslen til landbrugsjorden og B) mulighederne for at reducere fosfortabet fra landbrugsjord. Endeligt skulle arbejdsgruppen beskrive og vurdere virkemidler med kort-, mellemlang- og langsigtet effekt på nedbringelsen af dels fosforindholdet i husdyrgødningen og dels tabet af fosfor fra landbrugsjord, generelt og fra særlige risikoområder.

Som følge af opgavernes karakter fordelte gruppen opgaverne således, at en delgruppe tog sig af område A og en delgruppe af område B. Delgrupperne arbejdede selvstændigt, men ressourcepersonerne var fælles, og der blev foretaget en samlet afrapportering i form af en rapport, der er offentliggjort på [www.vmp3.dk](http://www.vmp3.dk).

Gruppen blev sammensat af følgende personer:

*Hovedområde A:* Jakob Sehested, Preben Bach Holm, Henrik Brinch-Pedersen og Hanne Damgaard Poulsen (formand), alle fra Danmarks JordbrugsForskning.

*Hovedområde B:* Brian Kronvang, Danmarks Miljøundersøgelser, Gitte Holton Rubæk, Tommy Dalgaard, og Jørgen F. Hansen (formand), alle fra Danmarks JordbrugsForskning.

Desuden supplerede gruppen sig med følgende ressourcepersoner, som alle har bidraget med materiale og udbytterige diskussioner af emnet:

Anker Laubel, Vejle Amt; Hans S. Østergaard, Leif Knudsen, Ole Aaes, Per Tybirk, Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret; Henrik Bang Jensen, Det Danske Fjerkræråd; Peter Sandbøl, Dansk Pelsdyravlerforening; Anders Brinch Larsen, Kalundborg Kommune, Goswin Heckrath, Mogens H. Greve, Bjarne S. Hansen, Arne Kyllingsbæk, Karoline Johansen, Danmarks JordbrugsForskning.

En lang række personer fra Danmarks Miljøundersøgelser og Danmarks JordbrugsForskning har desuden, som det fremgår af de enkelte afsnit, bidraget ved den faglige beskrivelse af delemlerne.

Opsætning af rapporten er foretaget af Lotte Tind Pedersen, og Margit Schacht har oversat sammentraget til engelsk.

Nærværende DJF-rapport præsenterer gruppens arbejde i en lettere redigeret version af den oprindelige rapport, idet der er lagt vægt på beskrivelse af den aktuelle status for fosfor i dansk landbrug.

Hanne Damgaard Poulsen og Gitte Holton Rubæk (red.)

Forskningscenter Foulum  
December 2005

# INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD .....	1
INDHOLDSFORTEGNELSE .....	2
SAMMENDRAG .....	5
SUMMARY - PHOSPHORUS IN DANISH AGRICULTURE .....	19
1. INDLEDNING .....	33
<i>Hanne Damgaard Poulsen, Jørgen F. Hansen, Gitte Holton Rubæk, Jakob Sehested og Arne Kyllingsbæk</i>	
1.1 Udvikling i fosforanvendelsen i dansk landbrug .....	33
1.2 Fosfor i den animalske produktion .....	36
1.3 Fosfor i planteproduktionen .....	38
2. FOSFOROMSÆTNING OG -UDNYTTTELSE HOS HUSDYR .....	39
2.1 Husdyr og fosfor .....	
<i>Hanne Damgaard Poulsen, Jakob Sehested og Karoline Johansen</i>	
2.2 Fosforindhold i husdyrgødning – status og udvikling over de seneste 20 år .....	39
<i>Hanne Damgaard Poulsen og Jakob Sehested</i>	
2.2.1 Fosforudskillelsen på enkeltdyrsniveau .....	39
2.2.2 Det samlede fosforindhold i husdyrgødning på landsplan (1985-2002) .....	43
2.2.3 Fosforindhold i foder og husdyrenes udnyttelse af det tilførte fosfor .....	44
2.2.4 Forbrug af mineralske fosfater i husdyrfoder .....	44
2.3 Muligheder for at reducere indholdet af fosfor i husdyrgødningen .....	45
<i>Jakob Sehested, Karoline Johansen og Hanne Damgaard Poulsen</i>	
2.3.1. Generelle indsatsområder .....	45
2.3.2. Svins fosforudnyttelse og mulighederne for forbedring .....	49
2.3.3 Kvægs fosforudnyttelse og mulighederne for forbedring .....	56
2.3.4 Fjerkræ's fosforudnyttelse og mulighederne for forbedring .....	64
2.3.5 Pelsdyrs fosforudnyttelse og mulighederne for forbedring .....	67
2.3.6 Økologisk husdyrproduktion .....	68
2.3.7 Øget fytaseproduktion i dyr ved bioteknologi .....	68
2.4 Øget fytaseindhold og reduceret fytinsyreindhold i planter ved hjælp af planteforædling og bioteknologi .....	69
<i>Henrik Brinch-Pedersen og Preben Bach Holm</i>	
2.4.1 Biotilgængelighed af fytatbundet fosfor .....	70
2.4.2 Forøgelse af fosfortilgængelighed i planter via planteforædling og bioteknologi .....	70
2.4.3 Transformation af planter (GMO) for forøget fytaseaktivitet i kernerne .....	70
2.4.4 GMO fytaseplanter som foder .....	71
2.4.5 Mutationsforædling for hæmning af fytinsyrebiosyntesen .....	71
2.4.6 Erfaringer med lavfytat-mutanter som foder .....	72
2.4.7 Muligheder for at reducere totalfosforindholdet i kerner og frø .....	72
2.4.8 Konklusion .....	73
2.5 Fodringsrelaterede virkemidler og deres effekt på fosforudskillelsen i husdyrgødning .....	73
<i>Hanne Damgaard Poulsen og Jakob Sehested</i>	
3. FOSFOROMSÆTNING I OG -TAB FRA MARKEN .....	81
3.1. Fosfortab fra det dyrkede areal – generelle betragtninger .....	
<i>Gitte Holton Rubæk, Brian Kronvang og Goswin Heckrath</i>	
3.2 Fosforbinding og -frigivelse i jord .....	85
<i>Gitte Holton Rubæk, Mogens H. Greve og Bjarne Hansen</i>	
3.2.1 Egenskaber af betydning for fosforbinding og frigivelse .....	86

3.2.2 Brug af generelle egenskaber til beskrivelse af fosforbinding og nedvaskningsforhold i danske jorde .....	88
3.2.3 Principper for regional kortlægning af jordens fosforbindende egenskaber.....	89
3.2.4 Principper for regional kortlægning af behov for kunstig dræning .....	90
3.2.5 Muligheder for kortlægning af markvariation (EM38).....	92
3.3 Fosfortilførsel, -ophobning og -mætningsgrad i danske landbrugsjorde .....	93
<i>Tommy Dalgaard og Gitte Holton Rubæk</i>	
3.3.1 Kortlægning af aktuel og historisk tilførsel af fosfor med husdyrgødning.....	95
3.3.2 Faktiske målinger af jordens fosforstatus .....	97
3.4 Monitering og estimering af fosfortab fra danske landbrugsarealer.....	102
<i>Brian Kronvang, Gitte Holton Rubæk, Jørgen Djurhuus, Goswin Heckrath, Carl Chr. Hofmann og Ruth Grant</i>	
3.4.1 Baggrundsbidrag .....	102
3.4.2 Spredt bebyggelse .....	104
3.4.3 Atmosfærisk deposition .....	105
3.4.4 Vinderosion.....	106
3.4.5 Vanderosion og overfladeafstrømning.....	107
3.4.6 Brinkerosion.....	111
3.4.7 Nedvaskning til dræn og øvre grundvand.....	115
3.4.8 Fosforbidrag fra dybereliggende grundvand.....	121
3.4.9 Samspil mellem tabsprocesserne på landbrugsarealer .....	122
3.4.10 Andre bidrag, herunder regnvandsbetinget udledning fra befæstede arealer.....	122
3.5 Tilbageholdelse/forsinkelse af fosfor fra mark til hav .....	123
<i>Brian Kronvang og Gitte Holton Rubæk</i>	
3.5.1 Tilbageholdelse af fosfor på vejen fra pløjelag til vandløb/sø/fjord.....	123
3.5.2 Betydning af ripariske bufferzoner for tilbageholdelse af fosfor fra landbrugsarealer...	124
3.5.3 Tilbageholdelse af fosfor i vandløbssystemet.....	129
3.6 Kvantificering af dyrkningsbidraget af fosfor til vandløb og søer.....	132
<i>Brian Kronvang og Gitte Holton Rubæk</i>	
3.6.2 Trends i det diffuse fosfortab fra 1989 til 2001 .....	140
3.6.3 Kvantificering af dyrkningsbidraget ud fra erfaringer og eksisterende målinger af fosfortab via kendte tabsprocesser .....	142
3.7 Kortlægning af risikoområder for tab ved erosion.....	146
<i>Peder K. Bøcher, Preben Olsen, Brian Kronvang, Jørgen F. Hansen og Hans E. Andersen</i>	
3.8 Perspektiver for udpeging af risikoområder for fosfortab via alle tabsprocesser .....	155
<i>Goswin Heckrath, Gitte Holton Rubæk og Brian Kronvang</i>	
3.8.1 Fremtidig model tilpasset danske forhold? .....	156
3.9 Effekter af driftsmetoder og dyrkningssystemer.....	157
<i>Gitte Holton Rubæk, Tommy Dalgaard og Jørgen F. Hansen</i>	
3.9.1 Jordbearbejdning.....	157
3.9.2 Gødskning .....	158
3.9.3 Økologisk jordbrug .....	161
3.10 Virkemidler og deres effekt .....	163
<i>Jørgen F. Hansen, Gitte Holton Rubæk og Brian Kronvang</i>	
3.10.1 Generelle virkemidler .....	164
3.10.2 Virkemidler i risikoområder.....	168
3.10.3 Oversigt over virkemidler og deres skønnede effekt .....	178
4. KONKLUSIONER .....	183
5. VIDENSBEHOV .....	187
5.1 Reduceret fosfortilførsel til landbruget og bedre fordeling på landbrugsarealerne .....	187
5.2 Undersøgelse og kvantificering af fosfortab fra forskellige kilder .....	188

5.3 Den miljømæssige effekt af fosfor i vandmiljøet.....	189
5.4 Foranstaltninger mod tabet af fosfor fra landbruget .....	189
5.5 Økonomiske konsekvenser af en indsats til forbedring af fosforhusholdningen .....	190
6. ORDLISTE .....	191
7. REFERENCER .....	195

## SAMMENDRAG

Denne rapport er udarbejdet som led i forberedelserne til Vandmiljøplan III (VMP III) af en teknisk undergruppe, der refererede til arbejdsgruppen for fosfor. Målet med rapporten er (A) at beskrive fosforomsætning hos husdyr og muligheder for gennem fodringsmæssige tiltag at begrænse fosfortilførslen til landbrugsjorden og (B) at beskrive fosforomsætning i og -tab fra landbrugsarealer til vandmiljøet og muligheder for begrænsning af dette fosfortab.

Fosfor er et livsnødvendigt næringsstof for både dyr og planter. En tilstrækkelig fosforforsyning til husdyrene og afgrøderne spiller derfor både produktions- og sundhedsmæssigt en vigtig rolle. Det er imidlertid væsentligt, at landbrugsproduktionen tilrettelægges sådan, at tabet af fosfor fra landbruget reduceres til et niveau, der svarer til målsætningerne for vandmiljøet.

Gennem det 20. århundrede er fosforanvendelsen i landbruget mere end 10-doblet fra omkring 10.000 tons i år 1900 til omkring 110.000 tons pr. år midt i firserne, hvorefter tilførslen er faldet til 71.000 tons pr. år ved årtusindskiftet. Fosforfratførslen i landbruget er samtidig steget fra ca. 7.000 tons år 1900 til ca. 38.000 tons pr. år. Op til midten af firserne var der en stigende årlig akkumulering af fosfor i landbrugsjorden. Derefter er akkumuleringsraten faldet, således at overskuddet ved årtusindskiftet udgjorde omkring 33.000 tons årligt.

En fosforbalance for år 2000 viser følgende fordeling på de enkelte poster (afrundede værdier):

<u>P-input, tons pr. år:</u>		<u>P-output, tons pr. år:</u>	
Handelsgødning	17.300	Planteprodukter	15.000
Affald inkl. slam og atmosfærebidrag	5.800	Animalske produkter	22.700
Foder	<u>48.200</u>	Tab	<u>1.000</u>
Total input	71.300	Total output	38.700
		Til jordens pulje	32.600

Den samlede udskillelse af fosfor med husdyrgødning på landsplan var ca. 55.000 tons (2000-niveau) og i 2002 52.000 tons, hvoraf 90% findes i husdyrgødning afsat i stalden, og resten afsættes på græs. Svin og kvæg er de store bidragsydere med henholdsvis 50% og 38%, mens de andre produktioner bidrager med 12%. Mængden af fosfor i husdyrgødning er faldet med omkring 10% i perioden fra 1985 og frem til nu på trods af en øget animalsk produktion. For året 2000/2001 fordeler fosfortilførslen til afgrøderne sig med ca. 9 kg pr. ha fra handelsgødning, affald og atmosfæren og ca. 22 kg pr. ha fra husdyrgødningen (dyrket areal minus permanent brak, år 2000). Bortførslen med afgrøderne er ca. 20 kg fosfor pr. ha pr. år. Det kan bemærkes, at nedgangen i husdyrgødningens indhold af fosfor fra 2000 til 2002 på 3.000 tons medfører en yderligere reduktion i husdyrgødningsbidraget på ca. 1,2 kg pr. ha.

I takt med de store reduktioner, der er opnået i fosforudledningen i forbindelse med rensning af spildevand fra byer og industri, har det diffuse tab af fosfor fra landbruget fået relativt større betyd-

ning i vandmiljøet. Den relative andel af det samlede fosfortab til vandmiljøet, som kommer fra landbruget (dyrkningsbidraget) er således steget fra omkring 20% i slutningen af firserne til omkring 50% i slutningen af halvfemserne.

Rapporten forholder sig til virkemidler, som sigter mod at øge husdyrenes fosforudnyttelse, til generelle virkemidler til reduktion af fosfortabet fra landbrugsjorden og til virkemidler, der rettes specifikt mod fosfortabet fra områder i landskabet (risikoområder), hvorfra fosfortabet anses for at være særligt stort. Da der ikke umiddelbart eksisterer muligheder for modelbaserede konsekvensberegninger af tiltag til reduktion af tabet, baseres rapportens vurderinger delvist på skøn foretaget med baggrund i den foreliggende faglige viden.

Rapporten afdækker også behov for ny viden, da der stadigvæk er ufuldstændig kendskab til husdyrenes fosforbehov og -udnyttelse og til fosforomsætning, -binding og -transport i jord. Der er desuden behov for viden om størrelsen af fosfortabet fra landbrugsjorden, og til hvordan dette tab påvirkes af dyrkningsmetoder, gødningstilførsel, vandløbsreguleringer, klimaændringer m.v.

#### **A. Fosforomsætning og -udnyttelse hos husdyr**

Husdyrenes fosforbehov dækkes gennem fodringen. Indholdet af fosfor i foderet stammer hovedsageligt fra foderstoffernes naturlige indhold, men dette indhold dækker dog sjældent dyrenes behov fuldstændigt, så derfor tilsættes også i mange tilfælde foderfosfater (mineralsk fosfat). Foderfosfaterne har imidlertid også meget varierende biotilgængelighed, hvilket direkte påvirker dyrenes potentielle udnyttelse af fosfor. I de senere år har der været forskningsmæssig fokus på dyrenes fysiologiske behov for fosfor og biotilgængeligheden af fosfor i fodermidler og foderfosfater, men der mangler stadig viden på en række områder, ligesom den nye viden endnu ikke er fuldt implementeret i praksis. Der er stor variation i husdyrenes udnyttelse af fosfor (5 til 57% hos henholdsvis mink og slagtekyllinger), og der er generelt et potentiale for at øge fosforudnyttelsen og reducere fosforudskillelsen i gødningen hos stort set alle kategorier af husdyr. Potentialet er dog meget forskelligt. Øget produktivitet som følge af avlsmæssig fremgang har generelt stor betydning for husdyrenes næringsstofudnyttelse, men disse tiltag har oftest et længere sigte. Samtidigt diskuteres mulighederne for at øge husdyrs absorptionskapacitet for fosfor gennem avlen. Hvorvidt dette er muligt må afklares via forskning indenfor området.

Der er generelt fire hovedområder, hvor der relativt hurtigt kan sættes ind for at forbedre fosforudnyttelsen: 1) Mere præcise fodringsanbefalinger baseret på dyrenes fysiologiske behov, 2) Tildeling af fosfor i forhold til det aktuelle behov; 3) Valg af råvarer med høj (bio)tilgængelighed af fosfor og evt. lavt indhold af fosfor; 4) Stimulering af udnyttelsen af fosfor i foderstoffer (eks. fytaseaktivitet) kombineret med mindsket brug af mineralsk foderfosfat. I rapporten gennemgås disse områder dels generelt, og dels specifikt i forhold til svin, kvæg, fjerkræ og pelsdyr.

#### *Indhold og tilgængelighed af fosfor i foder og mineralsk foderfosfat*

Der er kun begrænset variation i det naturlige fosforindhold indenfor en given type af fodermidler, men der er til gengæld stor variation i fosforindholdet mellem de forskellige typer af fodermidler. Derfor kan foderets naturlige fosforindhold i høj grad påvirkes gennem valg af fodermidler. I prak-



sis vil muligheden for valg af fodermidler dog ofte være begrænset af hensynet til andre næringsstoffer i foderrationen, til prisen på foderet og til sædskiftet på bedriften. Det er i praksis betydeligt lettere at ændre på forbruget af foderfosfat eller erstatte en type foderfosfat med en anden, selv om der også her er betydelige prisforskelle, ligesom foderfosfatets kvalitet (biotilgængelighed) ikke altid er veldefineret.

Den eksisterende viden viser, at biotilgængeligheden af fosfor varierer betydeligt i foderblandinger og -rationer og kan påvirkes betydeligt af f.eks. råvarevalg, varmebehandling (*Salmonella*-handlingsplan), lagring og forarbejdningsprocesser (f.eks. ensilering, presning, ekspandering eller støbsætning), samt tilsætning af hjælpestoffer (f.eks. fytase). Derfor kan udnyttelsen af fosfor potentielt påvirkes meget gennem brug af fodermidler med høj biotilgængelighed af fosfor, men her begrænses muligheden i praksis dog af mangel på viden om biotilgængelighed, især hos kvæg og fjerkræ, men også hos svin. Det gør, at fodringsnormerne fortsat indeholder betydelige sikkerhedsmarginer, og at den enkelte landmands mulighed for at optimere fosforudnyttelsen er begrænset.

Forbruget af foderfosfater til husdyr (17.800 tons P pr. år) svarer mængdemæssigt til ca. 1/3 af den samlede fosforudskillelse i husdyrgødningen, og fordeler sig med ca. 64, 25 og 11% på henholdsvis svin, kvæg og fjerkræ. Tilgængeligheden af fosfor i foderfosfaterne varierer betydeligt, og derfor er der et væsentligt potentiale i at bruge lettilgængelige foderfosfater for herigennem at reducere udskillelsen. Dette potentiale udnyttes allerede i nogen grad. Det er dog ikke realistisk helt at undlade brug af foderfosfater, idet potentialet for øget udnyttelse af det naturlige fosfor med den nuværende viden ikke altid er stort nok til alene at dække dyrenes behov. Den mest anvendte type foderfosfat er monocalciumfosfat.

#### *Fytat og fytase*

I foder baseret på kerner og frø (korn, sojaskrå etc.) er en stor mængde fosfor bundet i fytat, som enmavede dyr (svin, fjerkræ, mink mv.) kun i meget ringe grad kan nedbryde og udnytte. Dette er hovedårsagen til, at foderet ofte tilsættes ekstra fosfor i form af mineralsk foderfosfat. Fytat kan imidlertid nedbrydes enzymatisk af enzymet fytase, hvorved fosfor frigøres til absorption. Kvæg kan udnytte fytat-bundet fosfor på grund af mikrobiel fytase i formaverne, men ny viden indikerer, at tilgængeligheden af fosfor i kraftfodermidler til kvæg også bliver betydeligt reduceret ved varme- eller formaldehydbehandling. Fytase findes naturligt i plantefrø og kerner, men en positiv effekt forudsætter, at enzymet får mulighed for at "arbejde", hvilket bl.a. kræver, at foderet skal være fugtigt og ikke må udsættes for temperaturer over 60°C, hvor enzymet denaturerer. I forbindelse med bekæmpelsen af *Salmonella* er det blevet almindelig praksis på foderstoffabrikkerne at varmebehandle kornet (mindst 81°C). Denne varmebehandling er derfor i høj grad uheldig for den naturlige nedbrydning af fytatkomplekset.

Fytase er også kommercielt tilgængeligt og kan tilsættes foderet. Fytase (både det naturligt forekommende og det tilsatte) vil i høj grad kunne begrænse problemerne med den lave tilgængelighed, hvorved udskillelsen af ufordøjet fosfor med gødningen kan nedbringes. Tilsætning af fytase skal modsvares af en tilsvarende reduktion i tilskuddet af foderfosfat. Der er dog fortsat brug for ny vi-

den om anvendelse af både naturligt og kommercielt fytase i den praktiske fodring. Effekten af tilsat fytase er ikke konstant, men er meget påvirket af foderets sammensætning og indhold af naturligt fytase.

Der foreligger effektive muligheder inden for bioteknologi og planteforædling for at frembringe sorter, der anvendt i fodersammenhæng vil kunne reducere fosforudledningen via husdyrgødningen. Der arbejdes bl.a. med hvede med høj fytaseaktivitet (varmestabil) og byg med lavere andel af fytatbundet fosfor. Længst fremme er den genmodificerede fytaseraps (Phytaseed), Syngentas transgene fytaserige majs og majsmutanter med stort indhold af lettilgængeligt fosfor. Dyrkning af gensplejede fytaseafgrøder er dog i øjeblikket ikke realistisk under danske forhold. Med hensyn til afgrøder med lettilgængeligt fosfor er det sandsynligt, at fremtiden vil byde på andre alternativer end majs, f.eks. byg. Reduktion i andelen af fytatbundet fosfor og/eller stigning i fytaseaktiviteten i kerner og frø kan reducere behovet for tilskud af foderfosfat. På længere sigt kan et forædlingsmål mod et reduceret fosforindhold i planterne blive relevant. Dette kan dog kollideres med ønsket om at fjerne mest muligt fosfor fra jorde med højt fosforindhold gennem planteoptagelse.

Canadiske forskere har udviklet genmodificerede linier af Yorkshire grise kaldet "the Enviropig™", som producerer enzymet fytase i spytkirtlerne. Enzymet nedbryder fytat i maven på samme måde som mikrobiel produceret fytase tilsat foderet eller det naturligt forekommende fytase. Der er fundet væsentlig forøgelse i fosfor-fordøjeligheden og samtidig væsentlig reduktion i fosforudskillelsen hos de genmodificerede grise fodret med et majsbaseret foder. Effekten af mikrobiel fytase tilsat danske hvede/bygbaserede blandinger er imidlertid ofte lavere end fundet i udenlandske blandinger typisk baseret på majs, fordi fordøjeligheden af fosfor som udgangspunkt er lavere i majsbaserede blandinger sammenlignet med hvede/bygbaserede blandinger. Tilsvarende forventes det, at genmodificerede grise under danske forhold ikke i samme grad vil vise øget fordøjelighed af fosfor, idet danske svinefoderblandinger er baseret på byg og hvede og ikke på majs.

### *Kvæg*

Kvægets fosforudnyttelse varierer mellem 20 og 30%. Malkekøerne tegner sig for langt den største andel af det udskilte fosfor, og de har en fosforudnyttelse på knap 30%. Køernes forventede maksimale udnyttelsespotentiale for fosfor er i størrelsesordenen 35 til 40%, men der mangler viden på dette område, ligesom der mangler viden om biotilgængeligheden af fosfor i foder og foderfosfater til kvæg. Det vurderes, at ny viden på disse områder vil indebære et potentiale for forbedring af fosforudnyttelsen hos kvæg. Den lave potentielle udnyttelse skyldes primært drøvtyggernes specielle fysiologi, hvor fosfor i stort omfang recirkuleres til mavetarmkanalen. En øget udnyttelse forudsætter, at der fodres mere præcist og tættere på dyrenes individuelle fysiologiske behov. Det stiller krav til viden om dyrenes behov og til fodermidlernes indhold og fordøjelighed af fosfor samt til den praktiske fodring af det enkelte dyr. En oplagt mulighed for forbedring af kvægets fosforudnyttelse er at skabe ny viden om fordøjeligheden af fosfor i fodermidlerne og de faktorer, som påvirker denne. En anden mulighed er at skabe viden om regulering af fosfor-recirkuleringen gennem spytkirtlerne og absorptionen af fosfor fra formaverne og tarmen. Der er aktuelt mulighed for en forbedring af fosforudnyttelsen ved at reducere tildelingen i praksis til den aktuelle norm, og der er yderligere grundlag for at gennemføre en nedjustering af fodringsnormerne på grundlag af eksisterende viden

om dyrenes fysiologiske behov og fosfortilgængeligheden i foderet. Dette er påbegyndt. Fodermidlernes naturligt høje indhold af fosfor vil imidlertid i mange tilfælde begrænse muligheden for at nedregulere fosfortildelingen i praksis. Der er dog potentiale for en reduktion i anvendelsen af mineralsk foderfosfat til kvæg i størrelsesordenen 2.500 til 3.500 tons fosfor (55 til 75%), hvilket vil resultere i en reduktion i udskillelsen af fosfor i gødningen med i størrelsesordenen 20% hos malkekøerne. Tillige kan nævnes, at stigningen i produktivitet pr. malkeko koblet med det faldende antal køer kan indebære et potentiale for reduktion i fosforudskillelsen ved anvendelse af nye reducerede fodringsnormer for fosfor.

De danske fodringsnormer er opdelt i forhold til dyrenes livsytringer, mens den praktiske anvendelse af normerne betinger et koncentrationsinterval i foderet afhængig af dyregruppe, hvilket også begrænser den potentielle fosforudnyttelse, specielt hvis der er tale om uhomogene dyregrupper. Adgang til foderanalyser i praksis giver mulighed for at planlægge tildelingen af fosfor mere præcist, hvorimod manglende viden om fordøjeligheden af foderets fosforindhold betyder, at der fortsat skal være en sikkerhedsmargin i fodringsnormerne og fodringsplanlægningen, som tager hensyn hertil.

### *Svin*

Svinenes fosforudnyttelse varierer mellem 13 og 40%. Slagtesvinene tegner sig for ca. 66% af det udskilte fosfor og har en fosforudnyttelse på ca. 35-40%, mens søerne tegner sig for en stor del af resten med en udnyttelse på kun ca. 13%. Slagtesvinenes maksimale udnyttelsespotentiale for fosfor forventes at være i størrelsesordenen 55-60%, mens søernes potentiale må forventes at være lavere, men der mangler viden på dette område. Der er i de senere år kommet ny viden om biotilgængeligheden af fosfor i foder og foderfosfater til svin, samt om effekten af fytase, og denne viden er i nogen grad implementeret i praksis, men det vurderes, at ny viden fortsat vil indebære et potentiale for forbedring af fosforudnyttelsen hos svin. Der er nogen usikkerhed om størrelsen af effekten af tilsætning af mikrobiel fytase under danske forhold, idet effekten afhænger af foderblandingsens sammensætning, den naturlige fytaseaktivitet, varmebehandling (ift. *Salmonella*), støbsætning mm. Forsøg viser, at der med fytase kan opnås en fordøjelighed af det naturligt forekommende fosfor på omkring 60%, hvilket dermed også er det forventede niveau for maksimal udnyttelse hos svin. På grund af usikkerheder under praktiske forhold regner man dog ikke aktuelt med en fordøjelighed efter tilsætning af fytase på over 55% af foderets naturlige fosforindhold. Udskillelsen af fosfor hos svin kan reduceres i størrelsesordenen 15-27%, hvis der regnes med en fosfor-fordøjelighed på 50% og en tilsvarende reduktion i tildelingen. Ved antagelse af en fordøjelighed på 55% kan udskillelsen reduceres med 21-33% i forhold til den aktuelle fosforudskillelse. Det naturlige fosforindhold i svinefoder ligger på omkring 3,9 g pr. FE's til søer og slagtesvin og omkring 4,5 g pr. FE's til smågrise. Hvis fordøjeligheden af det naturlige fosfor kan øges til 50-55% og foderets fosforindhold kan ned sættes tilsvarende, vil det ikke være nødvendigt at anvende mineralsk foderfosfat til slagtesvin for at dække behovet. Derimod vil der fortsat være et behov for tilskud til smågrise- og sofoder, selv om dette også kan reduceres betydeligt. Behovet vil være størst hos diegivende søer. Teoretiske beregninger viser, at drægtige søers behov burde kunne dækkes uden tilskud af mineralsk fosfat, men der mangler fortsat viden på dette område. Beregninger under antagelse af, at fosforfordøjeligheden i svinefoder i praksis er 55%, og at slagtesvin ikke behøver tilskud af mineralsk fosfat, viser, at for-

bruget af foderfosfat kan reduceres fra 11.500 til 3.500 tons mineralsk foderfosfat, hvilket svarer til en reduktion på 75%.

#### *Høns og kyllinger*

Fosforudnyttelsen hos slagtekyllinger og konsumægshøner er beregnet til henholdsvis 57% og 22%, men slagtekyllingerne står alligevel for to tredjedele af fosforudskillelsen hos fjerkræ. Der er to væsentlige årsager til den lave fosforudnyttelse hos især konsumægshønerne. For det første er fordøjeligheden af fosfor i foderet lav og den præcise fordøjelighed ukendt, og for det andet overforsynes dyrene med fosfor for at kompensere for manglende viden om dyrenes reelle fysiologiske behov. Det har således i mange år været normal praksis at supplere foderet med et stort tilskud af uorganisk fosfor for at sikre, at dyrenes behov blev dækket. Potentialet for at reducere udskillelsen af fosfor er umiddelbart størst hos konsumægshøner, men der mangler viden både om biotilgængeligheden af fosfor, effekten af fytase i foderet, om hønernes fysiologiske behov samt om samspillet mellem bl.a. fosfor og calcium, idet høner har et stort calciumbehov til dannelsen af skal. Det vides derfor ikke pt., hvor stor en andel af den beregnede mængde foderfosfat (omkring 1.900 tons fosfor), som kan udelades, men det skønnes, at forbruget til fjerkræ kan reduceres til 800 tons.

#### *Mink*

Minks beregnede fosforudnyttelse ligger på ca. 5%. Det skyldes, at det fysiologiske behov er lavt i forhold til det naturlige indhold af fosfor i de affaldsprodukter såsom fiske- og fjerkræaffald, der traditionelt anvendes til minkfoder. Der suppleres ikke med mineralsk foderfosfat til mink, og derfor er der ikke et umiddelbart potentiale for at reducere fosforudskillelsen fra mink. Hvis fosforindholdet i pelsdyrfoder skal reduceres, betyder det, at fiske- og fjerkræaffald skal gennemgå en forarbejdning med henblik på at fjerne knoglerester, eller at der skal bruges foderstoffer med et lavere fosforindhold.

#### *Effekt af fodringsrelaterede virkemidler*

Det vurderes, at behovet for tilskud af foderfosfat dokumenteret gennem øget forskningsindsats kan reduceres til højst 6.000 tons pr. år. Det betyder, at fosforudskillelsen derved kan reduceres med omkring 11.800 tons, som fordeler sig på svin, kvæg og fjerkræ med ca. 8.000, 3.000 og 800 tons fosfor. Dette svarer til en reduktion på 23% i forhold til den samlede fosforudskillelse i husdyrgødning, som lå på ca. 52.000 tons i 2002.

Det vurderes, at en reduktion i fosforudskillelsen svarende til et mindsket foderfosfatforbrug på omkring 11.800 tons medfører, at der årligt på landsplan gennemsnitligt tilføres knap 5 kg mindre fosfor pr. ha (dyrket areal undtaget permanent brak). Den gennemsnitlige årlige fosfortilførsel med husdyrgødning var omkring 22 kg pr. ha i 2000/2001 og omkring 20,8 kg pr. ha i 2002 på landsplan. Ovennævnte tiltag vurderes derfor at medføre at den gennemsnitlige årlige fosfortilførsel med husdyrgødningen kan reduceres til omkring 15,8 kg pr. ha på landsplan. Det vurderes desuden, at det beregnede gennemsnitlige fosforoverskud på 13,4 kg pr. ha i 2000/2001 vil falde til 7,2 kg pr. ha, idet det antages, at reduktionen i foderfosfat ikke modsvares af en stigning i forbruget af handelsgødningsfosfat eller stigning i produktion. Det kan her nævnes, at det gennemsnitlige fosforbidrag fra handelsgødning ligger på 7 kg pr. ha og fra slam på 2 kg pr. ha i 2000/2001.

## B. Fosforomsætning i og -tab fra marken

Da jordens fosforpuljer har afgørende betydning for planters vækst, har man på dyrkede jorde tilstræbt at opbygge disse puljer til et niveau, hvor fosfor ikke begrænser udbyttet. Ophobningen af fosfor i landbrugsjord over sidste århundrede er estimeret til i gennemsnit 1,4 tons pr. hektar dyrket areal. Specielt i den første halvdel af det 20. århundrede var tildelingen af fosfor begrundet i et planteernæringsmæssigt behov. Således var omkring halvdelen af de fosforsyretil (gammel metode til bestemmelse af status for plantetilgængelighed af fosfor i jord), der blev analyseret i Jylland i 1950, under det anbefalede niveau. I dag ligger mindre end 10% af fosfortalsanalyserne (nugældende metode) under det anbefalede niveau og mere end halvdelen over det anbefalede niveau. Det betyder, at der omkring år 1950 stadig var behov for at øge fosforindholdet på store dele af landbrugsjorden, mens der, ud fra en planteernæringsmæssig synsvinkel, i dag mange steder vil kunne tæres på jordens fosforpulje uden udbyttmæssige konsekvenser.

Den geografiske fordeling af fosforophobningen har ændret sig i takt med landbrugets udvikling og strukturændringer. I de seneste årtier er ophobningen især sket i egne med stor husdyrtæthed som følge af ubalancen mellem indholdet af kvælstof og fosfor i husdyrgødningen, når denne anvendes til fuldøgning med kvælstof i planteproduktionen. Denne udvikling forstærkes af en relativ reduktion i kvælstofindholdet i husdyrgødning i forhold til fosforindholdet. Kortlægning viser, at husdyrproduktionen er koncentreret i særligt husdyrintensive områder i Jylland og på Fyn, mens husdyrholdet og dermed antageligt også ophobningen af fosfor er aftagende i de øvrige landsdele. Denne strukturudvikling hen imod en mere geografisk koncentreret husdyrproduktion har påvirket fosforophobningen i landbrugsjorden og har givetvis konsekvenser for risikoen for fosfortab til miljøet.

Der findes navnlig tre større datasæt, hvor faktiske målinger af jordens fosforindhold, -ophobning, -mætningsgrad eller plantetilgængelighed af fosfor i danske jorde er sat i relation til region, jordtyper o. lign. Disse datasæt er væsentlige for viden om danske jordes fosfortilstand. Det drejer sig om landmændenes analyser af jordens fosfortal, fosforanalyser i KVADRATNETTET og jordprofiler i Den Danske Jordprofildatabase. Ingen af disse datasæt kan i deres nuværende form anvendes til risikovurdering for fosfortab, men de kan på forskellig vis inddrages i fremtidigt arbejde med regional kortlægning og risikovurdering. Analysen af kvadratnetpunkter viser endvidere, at landbrugsområder gennemsnitligt har et større indhold af totalfosfor (ca. 4,6 tons pr. ha) end løvskovsJORDE (ca. 2,7 tons totalfosfor pr. ha) målt ned til 0,75 meters dybde. Også mætningsgraden med fosfor er større i landbrugsJORDE ned til denne dybde.

### *Landbrugsdrift og fosfortab*

I forhold til en naturtilstand har landbrugsdrift i sig selv indflydelse på mobilisering og omsætning af fosfor. Afstrømningsforhold og -mængde ændres, ligesom jordens evne til at binde og transportere fosfor påvirkes. Hertil kommer, at gødkning og høst har direkte indflydelse på størrelsen af jordens fosforpulje. Forskellige driftsmetoder og dyrkningssystemer påvirker jorden forskelligt. Jordbearbejdningserosion kan således, især på skrånende arealer, forårsage flytning af fosforrig overjord til lavninger, til hegn eller andre barrierer og tæt til vandløb, hvorved tabsrisikoen kan øges. Både normal jordbearbejdning og reduceret jordbearbejdning påvirker vandtransporten i jorden, men ikke på samme måde, og virkningen af forskellige former for jordbehandling på det potentielle fosfortab

er ikke entydig. Ofte forventes dog et mindre potentielt tab ved reduceret jordbearbejdning, især ved direkte såning af vintersæd, idet overfladen efterlades mere ujævn, ligesom der ofte kan være bedre betingelser for vandnedsivning.

Planteernæringsmæssigt sidestilles letopløseligt handelsgødningsfosfor og husdyrgødningsfosfor. Meget tyder dog på, at husdyrgødningsfosfor er mere mobilt og fordeler sig til en større dybde i landbrugsjorden end handelsgødning. Gødning, der ligger på overfladen, kan tabes via afstrømning på skrånende arealer, ved afstrømning via makroporer til kunstige dræn og højtliggende grundvand eller ved vinderosion. Også gødningsfordelingen kan have betydning, idet tabsrisikoen ved større tildelinger med længere tids mellemrum anses for at være lidt større end ved tildeling af samme dosis fordelt på årlige tildelinger. Ujævn gødningsfordeling efter græssende køer, frilandsgrise mv. kan ligeledes resultere i områder indenfor marken, hvor der findes store mængder fosfor i jorden og dermed større potentiel risiko for tab.

Spildevandsslam er en fosforkilde for landbruget, og ca. 60% af slammet fra danske rensningsanlæg indeholdende ca. 3.000 tons fosfor blev i 1999 udbragt på landbrugsjord. Dertil kommer mindre mængder slamprodukter fra private virksomheder. Gødskningsmæssigt kan fosfor tilført med spildevandsslam være mindre opløseligt og tilgængeligt, specielt med de nyere fældningsteknikker, hvor der bruges jern og aluminium ved fældning af fosfor i rensningsanlæggene, men på lidt længere sigt vil dette fosfor formentlig også indgå i jordens fosforpulje på lige fod med andet gødningsfosfor. Det er den officielle politik i Danmark, at anvendelsen af slam i landbruget betragtes som værende den mest miljørigtige disponering. En del kommuner har dog fravalgt den landbrugsmæssige genanvendelse af slammet, dels fordi der er faldende efterspørgsel efter slammet, dels fordi de ikke kan få garantier for en lang og stabil afsætning til landbruget.

### *Økologisk produktion*

Der er generelt ikke grundlag for at antage væsentlige forskelle i foderets fosforindhold eller udnyttelsen af fosfor mellem økologiske og konventionelle besætninger. Men økologiske besætninger er ofte mere begrænset i deres valg af fodermidler og tilsætningsstoffer (bl.a. fytase) end konventionelle, hvilket kan påvirke såvel foderets fosforindhold som tilgængeligheden af fosfor i forhold til i konventionelle besætninger. Desuden er produktionsniveauet ofte lavere, produktionstiden længere og foderforbruget større, hvilket kan medføre højere fosforudskillelse pr. produceret enhed, specielt i kødproduktionen (slagtesvin, kyllinger, slagtekalve/stude), men også hos søer og æglæggende høner.

Afgrødefordelingen i økologisk jordbrug, med relativt større arealer med flerårige afgrøder som kløver, græs og andet grøntfoder end i konventionelt jordbrug, kan medvirke til mindsket erosionsrisiko på erosionstruede arealer og dermed et mindre potentiale for tab af fosfor. Fosforomsætningen i økologisk jordbrug er generelt lavere end i konventionelt, men i nogle tilfælde kan fosforoverskuddet formentlig være større, dels fordi udbyttet og dermed også fosforfjernelsen er omkring 25% lavere end på konventionelle brug, dels fordi der ikke kan anvendes handelsgødning. Det betyder, at der generelt tilføres relativt mere husdyrgødning på økologiske end på konventionelle planteavlbrug. For økologisk kvæghold er der et strammere harmonikrav sammenlignet med konventionelt

kvæghold, og det kan medføre en mindre mængde fosfor udbragt pr. ha. Der er da også fundet mindre fosforoverskud på økologiske kvægbrug end på konventionelle. På økologiske svinebrug skyldes et større fosforoverskud den større anvendelse af frilandsgrise. Generelt er konklusionen, at økologisk jordbrug i den nuværende situation bidrager til at forbedre fosforudnyttelsen i landbruget og sænke tabet af fosfor til miljøet, men at der er tale om marginale effekter. En opretholdelse af de nuværende begrænsninger i valg af fodermidler og tilsætningsstoffer kan i fremtiden medvirke til at reducere mulighederne for at sænke gødningens indhold af fosfor i økologisk jordbrug.

### *Fosfors omsætning i jorden*

Fosfor mobiliseres fra landbrugsjorden med vand eller vind, men potentialet for fosfortab fra jord påvirkes også af jordens evne til at binde fosfor og af dyrkningsmæssige faktorer såsom plantevækst, gødsning og jordbearbejdning. Fosfor tabes både som opløst fosfor og som partikulært bundet fosfor og både på organisk og uorganisk form. Fosfor reagerer villigt med jordens faste bestanddele, og kun en meget lille del af jordens uorganiske fosfor er opløst i jordvæsken og derved umiddelbart tilgængeligt for planterne og for udvaskning som opløst fosfor med afstrømning fra rodzonen. På højbundsarealer er jordens bindingskapacitet for fosfor generelt stor, men i teorien begrænset. Jo større del af bindingskapaciteten, der er brugt, jo større fosformætningsgrad har jorden. Teoretisk set er fuldstændig mætning mulig, men i praksis er det irrelevant, da den såkaldte kritiske høje mætningsgrad indtræder længe før fuldstændig mætning. *Den kritiske mætningsgrad er defineret som der, hvor jorden har en mætningsgrad, der understøtter en fosforkoncentration i jordvæsken, som er højere end ønskeligt i forhold til udvaskning til vandmiljøet.*

Jordens bindingskapacitet for fosfor stiger i takt med stigende indhold af ler og jern- og aluminiumoxider, og jordens fosforbindingskapacitet varierer meget i Danmark. I mineraljorde findes hovedparten af jordens fosfor bundet i lerfraktionen eller på belægninger af jern- og aluminiumoxider på større partikler. På jorde med højt lerindhold kan der, især i forbindelse med kraftig nedbør, opløses fosfor og løsrives fosforrige partikler fra overjorden, som transporteres ned gennem sprækker og større porer til eventuelle drænrør dybere nede, og via disse blive transporteret ud til vandmiljøet. Fosforomsætning og –tab fra den meget uhomogene gruppe af lavbundsarealer i Danmark er relativt dårligt belyst, hvilket er uheldigt, da disse områder potentielt kan være væsentlige bidragsydere til det samlede dyrkningsbetingede fosfortab. Fosfor, der er bundet til jernforbindelser i jorden, kan for eksempel frigives igen under reducerende forhold, som kan opstå ved vandmættethed, f.eks. i forbindelse med etablering af permanente vådområder, i forbindelse med temporære høje grundvandspejl og meget lokalt i områder med dårlige afdræningsforhold.

Der er en principiel sammenhæng mellem jordens fosforstatus og risikoen for fosfortab. Dette er vist ved flere enkeltstående undersøgelser, hvor fosforstatus, målt f.eks. ved fosfortallet, varierede, medens transportbetingelserne var ensartede. Overordnet illustreres sammenhængen af, at der måles langt større tab af fosfor fra opgødskede landbrugsoplande end fra naturoplande. Imidlertid er der ikke tilstrækkelig viden til at kvantificere denne sammenhæng under praktiske forhold. Dertil kommer, at det i mange situationer er nødvendigt at inddrage hele jordprofilens evne til at binde og frigive fosfor og ikke kun pløjelagets fosforstatus.

Udvaskning af fosfor til drænrør eller grundvand udgør det største risikomoment på jorde, der ikke er erosionstruede. På dræned arealer viser eksisterende data, at en mindre andel (ca. 10-15%) af arealerne giver høje fosfortab via drænrørene. På disse arealer vil der kunne tabes fosfor via gennemgående porer i jorden fra nyligt tilført gødning og fra fosfor bundet i pløjelaget, men det er endnu ikke muligt at udpege disse arealer. På ikke erosionstruede arealer uden drænrør, hvor udvaskning i gængs forstand udgør det væsentligste risikomoment, er det vigtigt at sikre, at fosforophobningen ikke fører til kritisk høje mætningsgrader også i de dybere jordlag og at få vandbevægelsen og udvaskningen i sådanne jorde sikkert belyst. Heller ikke på disse arealer kan der udpeges risikoarealer med den nuværende viden.

### *Fosfortab fra landbruget*

Viden om fosfortabet til vandmiljøet fra forskellige kilder i Danmark stammer først og fremmest fra det landsdækkende overvågningsprogram NOVA. Tabet opdeles her i ikke-dyrkningsbetingede bidrag (baggrundsbidrag, grundvandsbidrag, spredt bebyggelse, atmosfærisk deposition og punktkilder) og i dyrkningsbidraget. Dyrkningsbidraget estimeres som differencen mellem det totale fosfortab og de ikke dyrkningsmæssige bidrag, og usikkerheden ved opgørelsen af de ikke-dyrkningsmæssige bidrag forplanter sig derfor til fastsættelsen af dyrkningsbidragets størrelse.

Dyrkningsbidraget (til fosfortabet) kan kvantificeres på national skala med forskellige indgangsdata fra NOVA og forskellige opskaleringsmetoder. Alt efter anvendt metode, periode og indgangsdata fås et dyrkningsbidrag på mellem 690 og 1.300 tons fosfor. Det estimerede dyrkningsbidrag har ikke ændret størrelse fra slutningen af firserne og frem til nu, og den fortsatte stigning i jordens fosforindhold i denne periode (godt 200 kg pr. ha i gennemsnit) afspejles således ikke i det målte tab. At der ikke kan konstateres ændringer i dyrkningsbidragets størrelse i måleperioden, kan tilskrives kombinationen af den store usikkerhed i bestemmelsen, de store år til år variationer i afstrømningen, og den forholdsvis korte tidsperiode, der er monitoreret i. Om det "sande" dyrkningsbidrag har ændret sig, kan der derfor kun gisnes om. I den periode, der er monitoreret i NOVA oplandene, er der sket andre ændringer af forskellig karakter, som formentlig har haft effekt –positiv eller negativ - på de diffuse fosforbidrag i oplandene. Det drejer sig for eksempel om skift til anvendelse af fosfatfrie vaskemidler, indførelse af to meters bræmmer og miljøvenlig vandløbsvedligeholdelse, forbud mod direkte udledninger fra gårde, krav om vintergrønne marker og ændret håndtering af husdyrgødning.

Der er en klar sammenhæng mellem de enkelte års dyrkningsbidrag og afstrømningen. Jo større afstrømningen er, jo større er dyrkningsbidraget. Stiger nedbørsmængden, som man i øjeblikket anser som en sandsynlig ændring i det danske klima, må det derfor forventes, at dyrkningsbidraget også stiger.

Det er ikke muligt med sikkerhed at splitte dyrkningsbidraget op på de forskellige tabsposter såsom erosion, overfladestrømning, nedvaskning til dræn, bidrag fra øvre grundvand m.v. I rapporten angives skøn over tabsposternes andel af det samlede bidrag. Disse skøn er dels baseret på enkeltstående undersøgelser af de forskellige tabsposter opnået i forskellige forskningsprojekter og dels ud fra erfaringer fra Landovervågningsprogrammet (LOOP). Skøn og beregningsforudsætninger fremgår af rapporten. Det samlede dyrkningsbidrag baseret på skøn over de enkelte tabsposter er på 440-



1.180 tons fosfor pr. år, hvilket er i god overensstemmelse med det ovenfor anførte dyrkningsbidrag estimeret ud fra vandløbsmålingerne i NOVA. De erosionsbetingede tab udgør lidt mere end halvdele af det skønnede samlede tab, og brinkerosionen er langt det største enkeltbidrag. Udvaskning via drænedede lavbundsjord er en anden væsentlig tabspost. For fastsættelsen af langt de fleste tabsposter gælder, at skøn og beregninger er overordentligt usikre, da de baseres på et yderst spinkelt datagrundlag. Endvidere dækker et sådant nationalt skøn over ganske betydelige variationer mellem forskellig oplandstyper. Tabsposter, der syner af lidt gennemsnitligt, kan være dominerende i nogle oplande.

Fosfor, der fjernes fra pløjelaget, kan opfanges eller forsinkes på dets vej mod vandområderne. Nedvasket fosfor kan tilbageholdes i dybere jordlag, hvis fysisk-kemiske forhold i de nye omgivelser betinger binding eller udfældning på partikulær form. Af det fosfor, der tabes fra marken ved vind- og vanderosion og overfladeafstrømning, vil kun en mindre del nå frem til vandløbssystemet, idet en stor del vil aflejres ved barrierer i landskabet såsom skove, hegn, veje o. lign. eller ved vanderosion blot der, hvor marken flader ud igen. Barrierer længere væk fra vandløbssystemet må anses for at sikre en mere permanent tilbageholdelse af fosfor end vandløbsnære barrierer som beskyttelseszoner langs vandløb (ripariske bufferzoner). Vandløbsnære beskyttelseszoner har især virkning overfor tab af partikulært fosfor, hvorimod evnen til at tilbageholde opløst fosfor er mere usikker. Jo større afstrømning og erosion, jo bredere skal zonen være for at yde tilstrækkelig beskyttelse. Forsøg har vist, at 5 - 10 m brede bufferzoner kan tilbageholde en stor andel af det tilførte partikulært bundne fosfor, og selv ved bufferzoner af 4 - 5 m bredde er der fundet tilbageholdelse på 41 - 97%. I danske forsøg med 2 og 6 m bræmmer er der konstateret forholdsvis stor tilbageholdelse selv i en 2 m bufferzone, dog ved relativt lave mobiliseringer af fosfor fra det ovenfor liggende areal. Også i vandløbssystemet kan fosfor tilbageholdes. Tilbageholdelse omfatter først og fremmest partikelbundet fosfor og finder hovedsageligt sted i søer og på kortvarigt oversvømmede engarealer i ådale, men også fældning af opløst fosfor i okkerholdige vandløb kan have stor betydning. Når vandløb får lov til frit at oversvømme lavt liggende engarealer i ådale har en enkelt undersøgelse i Danmark vist, at der kan tilbageholdes meget store mængder af partikulært bundet fosfor.

#### *Kortlægning af risikoområder*

Selv om fosfortabet fra landbrugsjorden til vandmiljøet er relativt lille (0,3 til 0,5 kg pr. ha) i forhold til størrelsen af landbrugsjordens fosforpulje (i gennemsnit 4.700 kg pr. ha ned til 75 cm's dybde) og i forhold til de årlige gødningstilførsler (godt 30 kg pr. ha), kan det være kritisk for vandkvaliteten specielt i søer og fjorde. Skal fosfortabet fra landbrugsjord til overfladevand reduceres i forhold til i dag, består opgaven derfor i at nedbringe et fosfortab, der størrelsesmæssigt i forvejen kun udgør en brøkdel af fosforindholdet i landbrugsjorden.

Fosfortab er en kompleks funktion af klima, topografi, hydrologi, jordbundsforhold, dyrkning og gødskning. Risikoen for fosfortab varierer derfor tidsligt og rumligt, både på regional-, oplands- og markniveau. Det betyder samtidig, at der eksisterer begrænsede områder, der bidrager betydeligt mere end andre til fosfortabet. Risikoområder, der benævnes *kritiske kildeområder* i den internationale litteratur, er områder, hvor en effektiv transportproces forbinder fosforkilder i landskabet med et vandløb. Identifikation af risikoområder i landskabet er afgørende for at kunne iværksætte tiltag

med hurtig og sikker virkning i vandmiljøet og bør kunne udføres med stor detaljeringsgrad og præcision. Herved kan tabsbegrænsende foranstaltninger iværksættes på relevante arealer, hvorved indsatsen bliver mere omkostningseffektiv, både mht. miljøet og landbruget. Der findes kun få undersøgelser og modeller internationalt, der kan opsplitte kildeområder og transportveje for fosfor til vandløb, søer og fjorde på regional eller lokal skala, og ingen af dem er umiddelbart anvendelige under danske forhold. Den nødvendige viden til udvikling af brugbare værktøjer til udpegning af risikoområder på relevant skala under danske forhold bør derfor skaffes. En vigtig opgave i udviklingen af et modelværktøj for fosfortab er en vurdering af, hvilken skala der i praksis vil være den optimale for risikovurdering. Et andet fokusområde vil være mulighederne for at vurdere interaktioner mellem virkemidler f.eks. kan nedsættelse af erosionstab gennem øget vandinfiltration i jorden eventuelt øge risikoen for tab af fosfor gennem nedsivning.

Jordens evne til at binde og frigive fosfor er af væsentlig betydning for tabsrisikoen. Ved vurdering heraf skal hele jordprofilen tages i betragtning, og den traditionelle inddeling af danske jorde efter tekstur eller endnu grovere i sandede og lerede jorde er helt utilstrækkelig. Danske jordes evne til at binde fosfor er ikke kortlagt, men væsentlige generelle egenskaber, som kan bidrage til en karakterisering af danske jordes evne til at binde og til at translokere fosfor findes i forskellige databaser. Det anses derfor for sandsynligt, at der via en forskningsindsats kan udvikles det nødvendige grundlag for en kortlægning af danske jordes evne til at binde og transportere fosfor ned gennem jordprofilen på basis heraf. Forskningsindsatsen vil formentlig være af særlig betydning i mere sandede områder og i områder med lavbundsjarde, hvor viden om tabsprocesserne er sparsom. I en sådan indsats bør derfor også indgå detailstudier, der belyser de væsentlige aspekter af fosfortab fra sådanne områder.

Tab af fosfor via nedvaskning i højbundsområder er nært knyttet til hurtig transport gennem jorden via makroporer til eventuelle kunstige dræn i jorden, og til hvordan drænenene er forbundet med vandløbssystemet. Om og hvordan en højbundsjord er drænet afhænger af dens naturlige evne til lede vandet bort. Kunstig dræning er samtidigt en væsentlig parameter i alle vandtransport- og vandbalancebetragtninger på lerjord, og vandtransporten påvirker fordelingen af fosfor i jordprofilen og derfor også det potentielle fosfortab. Mellem 70 og 80% af de danske lerjorde er systematisk drænet med rørdræn i ca. 1 meters dybde. Afstrømningen i kunstige dræn svinger normalt mellem 50 og 90% af overskudsnedbøren, resten danner grundvand. Desværre findes der kun i meget begrænset omfang oplysninger om drænedede arealer og drænenes beliggenhed på digital eller anden let tilgængelig form. Danmarks JordbrugsForskning (DJF) har tidligere udpeget områder med større eller mindre afvandingsbehov, men da der nu foreligger langt bedre oplysninger på digital form og bedre GIS værktøjer, vil kortlægning af drænbehov og muligheder for nedsivning af overskudsnedbør kunne forbedres væsentligt. Såfremt der via forskningen skabes den fornødne viden til udpegning af områder, hvor en stor andel af drænafstrømningen sker via strømning i makroporer direkte til drænrørene, kan kortlægning af drænbehov formentlig udbygges til også at omfatte udpegning af risikoområder for fosfortab via drænrør.

Fosfortab via erosion og overfladeafstrømning er især påvirket af topografi, jordtype, klima og dyrkningsforhold. Ved anvendelse af de ”stationære/permanente” parametre jordens erodibilitet

(K), skråningslængden (L) og skråningsgradienten (S) er der foretaget en kortlægning af potentielle erosionsrisikoområder. Kortlægningen er et udtryk for den potentielle erosionsrisiko men siger ikke noget om det aktuelle erosionstab i området, idet dette også afhænger af klimasituationen, driftsformen og arealanvendelsen. Graden af erosion målt i forsøg viste sig i stor udstrækning at være i overensstemmelse med de modellerede KLS-værdier. På baggrund heraf er det vurderet, at områder med KLS-værdier over 85 udgør højt erosionstruede områder. Arealet af disse områder udgør godt 500 km<sup>2</sup> i de kortlagte dele (hele landet minus Bornholm og Fyn). Kortlægningens formål var en afgrænsning af områder med potentiel erosionsrisiko beliggende i ferskvandsnære områder og dermed en udpegning af områder af særlig interesse i erosionssammenhæng. Kortlægningen kan derimod ikke anvendes til konkret udpegning af steder, hvor der skal foretages en erosionsbæmpende indsats. Dertil kræves yderligere og mere detaljerede undersøgelser.

### *Virkemidler mod fosfortab*

I rapporten foreslås en række mulige virkemidler til reduktion af fosfortabet fra landbruget til vandmiljøet. Disse er inddelt i to overordnede grupper: *Generelle virkemidler* og *Virkemidler i risikoområder*. Flere af virkemidlerne vil kunne kombineres, men effekterne vil ikke nødvendigvis kunne adderes. Virkemidlerne er yderligere grupperet i fire kategorier: (1) *Driftsmæssige foranstaltninger*, som er handlinger, der foretages i forbindelse med den daglige drift af ejendommen. Dvs. valg af jordbearbejdningsmetoder, gødskning, afgrødevalg, fodringspraksis mv., (2) *Arealændringer*, som er foranstaltninger, der medfører midlertidige eller langvarige evt. permanente ændringer i arealanvendelsen, (3) *Miljøforvaltning*, som omfatter virkemidler, hvor det kan forventes, at de ofte initieres for en gruppe af landmænd i tæt samarbejde mellem landmænd og forvaltning eller på forvaltningens initiativ og (4) *Produktionsreguleringer*, som sigter mod at påvirke og regulere produktionen, således at der indbygges miljøhensyn i produktionsmetoderne. Flere af de opstillede virkemidler kan have væsentlige afledte effekter på produktion og strukturudvikling.

Generelle virkemidler er foranstaltninger, som kan anvendes over store dele af landet og med virkning for alle bedrifter. Endvidere er det virkemidler, hvor den umiddelbare effekt er en reduktion i fosfortilførslen til jorden, hvorimod tidshorisonten for virkningen på fosfortabet og dermed på miljøet generelt vil være lang. Sådanne virkemidler modvirker, at der opstår nye risikoområder og påvirker derfor potentialet for fosfortab på lang sigt. De generelle virkemidler løser derimod ikke på kort sigt akutte miljøproblemer forårsaget af for store fosforudledninger til vandmiljøet. Det må forventes, at effekten af reduceret fosfortilførsel til jorden vil variere fra sted til sted, afhængig af bl.a. jordbundsforhold, nærhed til sårbare vandområder, jordens fosformætningsgrad mv. For at opnå væsentlig reduktion i fosfortabet fra landbrugsjorden ved hjælp af generelle virkemidler skal fosfortilførslen i mange områder være mindre end bortførslen med afgrøderne, således at der tæres på jordens fosforpulje. En sammenhæng mellem forskellige mål for jordens fosforstatus, f.eks. fosfortallet, og risikoen for fosfortab er dokumenteret, men der er imidlertid ikke tilstrækkelig forskningsmæssig baggrund for at kvantificere denne sammenhæng under praktiske forhold.

Virkemidler i risikoområder tænkes anvendt i særligt udpegede begrænsede områder. Disse virkemidler er i de allerfleste tilfælde virkemidler med forventet hurtig virkning på fosfortabet. De fleste vil kunne anvendes i områder med eksisterende miljøproblemer (eksempelvis ved søer og fjorde),

hvor der er behov for en indsats her og nu. Næsten alle virker ved på kort sigt at hindre udledning af fosfor til vandmiljøet, hvorimod kun nogle få medfører reduktion i eller ophør af fosfortilførslen til jorden.

Det er meget vanskeligt at kvantificere effekten specielt af de generelle langsigtede virkemidler, fordi fosfortabet opstår i et samspil af komplekse processer med store variationer i tid og rum. Der er heller ikke den nødvendige viden til at kvantificere det fosfortab, der ville være i en såkaldt referencetilstand (som svarer til naturtilstanden), det ekstra fosfortab der måtte være opstået på grund af jordens opdyrkning (med deraf følgende ændringer i hydrologi og plantedække) og det yderligere tab, der er forbundet med ophobningen af gødningsfosfor i jorden. At tabet samtidig er forholdsvis lille set i forhold til de store mængder fosfor, der er i kredsløb i landbrugsområderne, vanskeliggør en kvantificering yderligere. Skøn af virkemidlernes effekt er gjort ud fra en "alt andet lige" forudsætning. Det vil for eksempel sige, at den langsigtede effekt af en mindsket fosfortilførsel til landbrugsarealerne og en bedre fordeling af fosforet over landbrugsarealet er gjort under forudsætning af uændret klima, drift, afgrøder etc. I den sammenhæng er det vigtigt at være opmærksom på, at ændringer i klima mv. i sig selv kan være mere betydende for fosfortabet end de ændringer, der vil kunne tilskrives de generelle virkemidler. Går klimaændringerne i retning af større og mere intens nedbør, som man formoder i øjeblikket, vil risikoen for fosfortab øges væsentligt, og det gælder vel at mærke alle de tabsprocesser, der har med vandbevægelse at gøre (brink- og overfladeerosion, overfladeafstrømning og nedvaskning). Da dyrkningsbidragets størrelse samtidigt varierer meget fra år til år, og da der er store usikkerheder forbundet med fastsættelsen, kan det være vanskeligt at monitere beskedne, men i øvrigt sikre reduktioner i fosfortabet, der måtte være et resultat af iværksættelsen af forskellige virkemidler.

### **Overordnet konklusion**

Et grundlæggende træk ved fosforproblematikken i landbruget er, at der på nationalt eller regionalt plan kun over længere tidsrum kan forventes sammenhæng mellem tilførsel og tab af fosfor. En reduktion i fosfortilførslen til landbrugsarealet generelt må således først forventes at vise effekt i miljøet på længere sigt. På kortere sigt må der sættes ind med andre målrettede foranstaltninger, som direkte og med en umiddelbar virkning tager sigte på at reducere fosfortabet fra arealer, hvor der er særlig risiko for tab.

*Den ideelle strategi på forforområdet opnås derfor ved anvendelse af generelle virkemidler til begrænsning af fosforophobningen og forbedret fordeling af fosfor på hele landbrugsarealet kombineret med en særlig indsats mod fosfortabet fra specifikke risikoarealer.*

## SUMMARY - PHOSPHORUS IN DANISH AGRICULTURE

### Turnover, losses and mitigation measures

This report has been produced by a technical subgroup to the departmental phosphorus-working group in preparation for the third Action Plan for the Aquatic Environment (VMP III). The aim of the report is a) to describe the turnover of phosphorus in Danish livestock production and the potential for reducing phosphorus inputs to agricultural soils and b) to describe the turnover in and losses of phosphorus from agricultural soils to the aquatic environment and the potential for reducing these losses.

Phosphorus is an essential nutrient for both animals and plants. An adequate supply of phosphorus to livestock and crops is therefore important for both production and health. It is, however, crucial that farmers incorporate reductions in phosphorus losses into their management systems in order to meet the governmental targets set for the aquatic environment.

The 20<sup>th</sup> century has seen a more than tenfold increase in the agricultural use of phosphorus, from 10,000 tonnes in 1900 to 110,000 tonnes in the mid 1980s, with a subsequent fall to 71,000 tonnes per year at the turn of the millennium. In the same period, agricultural phosphorus output in products rose to 38,000 tonnes from 7,000 tonnes in 1900. Until the mid 1980s there was an increase in the annual phosphorus accumulation in agricultural soils, whereafter this subsequently fell, and the annual surplus was 33,000 tonnes in year 2000. All figures are approximations.

The phosphorus balance for year 2000 shows the following input and output sources (rounded values):

<u>P input, tonnes per year:</u>		<u>P output, tonnes per year:</u>	
Mineral fertilizer	17,300	Plant products	15,000
Waste, incl. sewage sludge and atmospheric contribution	5,800	Animal products	22,700
Animal feed	<u>48,200</u>	Losses	<u>1,000</u>
Total input	71,300	Total output	38,700
		Soil accumulation	32,600

At the national level, phosphorus excretion in animal manure totalled 55,000 tonnes (year 2000 level) and 52,000 tonnes in 2002. Pig and cattle productions are the main sources, contributing, respectively, 50% and 38%, while other productions contribute 12%. The phosphorus level in animal manure has fallen by about 10% in the period from 1985, despite an increased livestock production. In 2000/2001, phosphorus input to arable land (excluding permanent fallow) totalled 31 kg per ha, with 9 kg deriving from mineral fertilizer, waste products and the atmosphere and 22 kg from animal manure. The output in crops was 20 kg phosphorus per hectare per year. The reduction from 2000 to 2002 in the phosphorus content of animal manure has resulted in a further reduction of approx. 1.2 kg per hectare in the input to soil from animal manure.

The efficient removal of phosphorus by wastewater treatment systems since the late 1980s has meant that the agricultural contribution of diffuse losses to the aquatic environment has become relatively more important, representing 50% of total losses in the late 1990s compared with 20% in the late 1980s.

This report will be assessing the measures that 1) focus on improving the phosphorus utilization of livestock, 2) aim to reduce phosphorus losses from agricultural soils generally, and 3) are specifically targeted at reductions in high-risk areas. As scenario model calculations are not available, the estimates in the report are based partly on available knowledge and expert assessments.

The report will also identify areas where additional information is needed, as our knowledge of the phosphorus utilization and requirements of livestock, and of the turnover, storage and transport of phosphorus in agricultural soils is still very limited. There is also a need to quantify losses from agricultural soils and how they are affected by cropping techniques, nutrient applications, regulations of watercourses, climate change, etc.

## **A. Phosphorus metabolism and utilization in livestock**

Livestock phosphorus requirements must be met by their feed intake. Livestock feeds have an endogenous phosphorus content, but this is rarely sufficient for the livestock requirements, why mineral feed phosphates are often supplemented. The bioavailability of feed phosphates is, however, very variable and therefore directly affects the potential livestock phosphorus utilization. In recent years, research has focused on animal physiological phosphorus requirements and on the bioavailability of phosphorus in animal feeds and feed phosphates, but our knowledge is still inadequate in a number of fields or needs practical implementation. Livestock phosphorus utilization is species-dependent (e.g. 5 and 57% for, respectively, mink and broilers), and for most species phosphorus utilization can potentially be increased and phosphorus excretion reduced, although the potential varies between species. Increased productivity via selective breeding programmes is generally important for livestock nutrient utilization, but these are usually long-term strategies.

There are four main approaches to improving phosphorus utilization relatively quickly: 1) feed recommendations can be better tailored to animal physiological requirement, 2) phosphorus can be allocated according to actual requirement, 3) feedstuffs with a high phosphorus bioavailability can be used, possibly combined with a low phosphorus content, 4) phosphorus availability of feedstuffs can be stimulated (e.g. phytase activity) and can be combined with a reduction in inorganic feed phosphate supplementation. The report covers all these areas, both on a general level and also specifically in relation to pigs, cattle, poultry, and fur animals.

### *Content and availability of phosphorus in feedstuffs and mineral feed phosphates*

The endogenous phosphorus content within feedstuffs varies only little, but there is considerable variation between different types of feed. The endogenous level of phosphorus fed to livestock can therefore be controlled through feed composition. In practice, however, the choice will often be limited as other nutrients will have to be taken into account, as will the price of the feedstuffs and the

crop rotation system on the farm. It is usually much easier to change the level of phosphorus supplementation or to replace one feed phosphate with another, although prices here also vary considerably and the quality (bioavailability) of the supplement is not always well specified.

Existing knowledge shows that the bioavailability of phosphorus varies considerably between compound diets and rations and is clearly affected by choice of feedstuffs, heat treatment (*Salmonella* action plan), storage and pretreatments such as silaging, pressing, expanding or soaking, and the inclusion of additives such as phytase. Choosing feeds with a high bioavailability of phosphorus therefore has a significant effect on the potential phosphorus utilization, although this has practical limitations, as knowledge of the bioavailability, particularly for cattle and poultry but also for pigs, is scarce. Feed standards therefore still contain considerable safety margins and limit the individual farmer's ability to optimize phosphorus utilization.

The use of feed phosphates in livestock farming (17,800 tonnes phosphorus per year) corresponds to a third of the total amount of phosphorus excreted in animal manure, with pigs, cattle and poultry contributing, respectively, 64, 25 and 11%. The bioavailability of phosphorus in feed phosphates varies significantly and there is therefore considerable potential in using highly available feed phosphate to reduce the level of phosphorus excretion. This has to some extent already taking place. It is, however, unrealistic to believe that feed phosphates can be completely avoided, as the utilization of endogenous phosphorus is insufficient to satisfy animal requirements. The most commonly used feed phosphate is monocalcium phosphate.

#### *Phytate and phytase*

Grain- and seed-based feedstuffs (e.g. cereals, soya cake) contain large quantities of phosphorus bound as phytate, which has low bioavailability to monogastric animals (pigs, poultry, mink, etc.). This is predominantly why some animal feeds require inorganic feed phosphate supplements. Phytate can, however, be hydrolysed by the enzyme phytase, rendering the phosphorus available for absorption. Cattle are able to utilize phytate-packaged phosphorus due to microbial phytase activity in the foregut, but new knowledge indicates that the bioavailability of phosphorus in cattle feed concentrates is considerably reduced by heat or formaldehyde treatment. Phytase is an endogenously occurring enzyme in plant seeds and grains, but a positive effect can only be achieved if the enzyme is given suitable conditions, which means that the feed has to be moist and must not be exposed to temperatures exceeding 60°C, at which temperature the enzyme denaturises. It has become common practice for feed manufacturers to heat-treat grain (at minimum 81°C). This heat-treatment has unfortunate consequences for the endogenous decomposition process of the phytate complex.

Phytase is available as a commercial feed additive. Both endogenous and added phytase reduce the problems of low phytate degradation, thus limiting the excretion of undigested phosphorus in manure. There is still a need for additional knowledge from practical feeding experiments on the utilization of both endogenous and supplemented phytase, as the effect of added phytase is not constant but affected by feed composition and the concentration of endogenous phytase.

Biotechnology and plant breeding programmes enable the production of new varieties that may reduce the phosphorus content in animal manure. This involves experiments on varieties of e.g. wheat with a high phytase activity (heat-stable) and on barley with a lower level of phytate-bound P. At the most advanced stage are genetically modified oilseed rape (Phytaseed), Syngenta's transgenic phytase-rich corn, and mutants of corn with a high content of readily available P. The production of genetically modified phytase crops is, however, at present not realistic under Danish conditions. As regards crops with a high level of readily available P, it is quite possible that there may be future alternatives to corn, such as barley. A reduction in the relative content of phytate-bound phosphorus and/or an increase in the phytase activity of grain and seeds may reduce the need for phosphate supplementing in feeds. A long-term breeding programme to reduce plant phosphorus levels may be relevant, although this could conflict with the desire to reduce soil phosphorus levels by increasing plant uptake.

Canadian scientists have developed new genetically modified breeds of Yorkshire pigs called the Enviropig™ that produce phytase in the salivary glands. The enzyme degrades phytate in the stomach in the same way as the microbial phytase additives or the endogenously occurring phytase. There is a marked increase in phosphorus digestibility and a consequent decrease in phosphorus excretion in the genetically modified pigs fed a corn-based diet. The effect of microbialphytase supplements in Danish wheat/barley-based mixtures is, however, often smaller than diets based on corn, as the digestibility of phosphorus in corn-based diets in general is lower than in wheat/barley-based feeds. Under Danish conditions, genetically modified pigs are therefore not expected to show a similar increased digestibility of P, as Danish pig feeds are based on barley and wheat and not on corn.

### *Cattle*

The phosphorus utilization of cattle varies between 20 and 30%. Dairy cattle are by far the largest contributor of excreted phosphorus and have a phosphorus utilization of nearly 30%. The potential maximum phosphorus utilization for cattle is expected to be between 35 and 40%, but we have insufficient knowledge of this and of the bioavailability of phosphorus in feed and feed phosphates for cattle. With additional knowledge, the phosphorus utilization in cattle could potentially be increased. The low phosphorus utilization is primarily due to the special physiology of ruminants, where phosphorus to a large extent is recycled to the gastrointestinal tract. An increase in phosphorus utilization requires a more precise tailoring of the feeding in relation to the individual requirements and to contents and digestibility of phosphorus in feedstuffs and rations, and also in terms of the practical feed allocation. Obvious methods of improving cattle phosphorus utilization is to improve our understanding of phosphorus digestibility of feedstuffs and rations and the factors that have an influence on this. Furthermore, we need a better understanding of the recirculation of phosphorus through the salivary glands and its absorption. It is possible to improve phosphorus utilization by reducing the phosphorus allocation in practice so that it complies with current feeding standards. It is possible to reduce the feeding standards on the basis of existing knowledge of animal physiological needs and of the bioavailability of phosphorus in feed. This work has already been started. The high endogenous phosphorus content in animal feedstuffs will, however, to a certain extent limit the scope for a reduction in phosphorus. The use of mineral feed phosphates to cattle



could, however, potentially be reduced by 2,500-3,500 tonnes phosphorus (55-75%), which would result in a 20% reduction in the excretion of phosphorus by dairy cattle. The increase in dairy cow productivity combined with the fall in numbers also gives scope for a reduction in phosphorus excretion if new reduced feeding standards for phosphorus are implemented.

Danish feeding standards are specified in relation to individual animal performance, but in practice the level in the feed has to be sufficient to cover the requirements of the group to which it is fed, which limits the potential phosphorus utilization, particularly if the groups are inhomogeneous. Analysis of individual feeds would enable a more precise allocation of P, whereas insufficient knowledge of the digestibility of the dietary phosphorus contents means that feeding standards and planning have to take this into account in their safety margins.

### *Pigs*

The phosphorus utilization by pigs varies between 13 and 40%. Fattening pigs contribute approx. 66% of the excreted phosphorus, while sows with a phosphorus utilization of roughly 13% excrete much of the remaining P. The maximum potential phosphorus utilization of fattening pigs is thought to be in the region of 55-60%, while the potential of sows may be lower, but there is insufficient knowledge in this area. More knowledge about the bioavailability of phosphorus in diets and feed phosphates to pigs and about the effect of phytase has become available recently. This knowledge has to a certain extent been implemented in practice, but additional knowledge could potentially further improve the phosphorus utilization in pigs. There is some uncertainty regarding the size of the effect of microbial phytase additions under Danish conditions, as the effect depends on the composition of the feed, the endogenous phytase activity, heat treatment (for *Salmonella*), soaking, etc. Experiments show that the addition of phytase results in a digestibility of the endogenous phosphorus of around 60%, which is therefore the maximum phosphorus utilization level expected for pigs. Realistically, the digestibility cannot be expected to exceed 55% of the endogenous animal feed phosphorus content due to the inherent uncertainties. The phosphorus excreted by pigs can be reduced by 15-27% if a phosphorus digestibility of 50% and a corresponding reduction in the phosphorus allocation is assumed. If a phosphorus digestibility of 55% is assumed, then excreted phosphorus can be reduced by 21-33%. The endogenous phosphorus content in feed is around 3.9 g per Feed Unit (FU) for sows and fattening pigs and around 4.5 g per FU for weaners. If endogenous phosphorus digestibility can be increased to 50-55% and the phosphorus supplementation in feed similarly reduced, it will not be necessary to use mineral feed phosphate supplements to fattening pigs in order to meet their needs. There will, however, still be a need to supplement the feed for weaners and sows, although this could also be significantly reduced. Nursing sows would have the largest requirement. Theoretical calculations show that phosphorus requirements of pregnant sows could be met by the endogenous content, but there is a lack of knowledge in this area. Calculations based on the assumption that phosphorus digestibility in pig feed is 55% in practice and that fattening pigs need no mineral phosphate supplements show that the consumption of feed phosphate can be reduced from 11,500 t to 3,500 tonnes mineral feed phosphate, corresponding to a reduction of 75%.

### *Laying hens and broilers*

Broilers and laying hens have a phosphorus utilization of, respectively, 57% and 22%, but broilers are nevertheless responsible for two thirds of phosphorus excreted by poultry. There are two main reasons for the low phosphorus utilization of laying hens. Firstly, the digestibility of the phosphorus in their feed is generally low with no exact figures available and, secondly, the poultry are oversupplied with phosphorus to compensate for a lack of knowledge about their physiological needs. For many years it has therefore been normal practice to supplement large quantities of inorganic phosphorus to ensure that the needs of poultry were met. There is therefore a considerable potential for reducing the phosphorus excretion by especially laying hens, but there is insufficient knowledge about the bioavailability of the phosphorus, the effect of phytase in the feed, the physiological needs of laying hens and about the relation between phosphorus and calcium, as hens require calcium for the production of the egg shell. It is therefore uncertain how much of the phosphate in the feed (an estimated 1900 tonnes) can be left out of their diet, but it is estimated that it could be reduced to 800 tonnes.

### *Mink*

The phosphorus utilization of mink is approx. 5%. This is because they have a very moderate physiological need compared with the endogenous phosphorus content in the fish and poultry by-products that are traditionally used as mink feed. Mink receive no mineral phosphate supplements in their feed and there is thus no immediate potential for reducing their phosphorus excretion. If phosphorus excretion were to be reduced, it would mean that the fish and poultry by-products used in their feed would have to be processed in order to remove the bone, or that feedstuffs with a lower phosphorus content would have to be used.

### *Effect of feeding-related measures*

Phosphorus supplementation in feed can be reduced to an estimated maximum of 6,000 tonnes per year. This results in a reduction in phosphorus excretion of 11,800 tonnes, with, respectively, 8,000, 3,000 and 800 tonnes from pigs, cattle and poultry. This corresponds to a 23% reduction in the overall level of phosphorus excretion (52,000 tonnes in 2002).

With a reduction in phosphorus consumption corresponding to a reduction in phosphorus excretion of around 11,800 tonnes, the estimated overall reduction in phosphorus input per hectare would be 5 kg (farmed area less permanent fallow). In 2000/2001 the annual average application of phosphorus in animal manure was 22 kg per ha and 20.8 kg in 2002. At the national level the above measures could therefore reduce phosphorus in animal manure to an estimated 15.8 kg per ha. The phosphorus surplus of 13.4 kg per ha in 2000/2001 would similarly fall to an estimated 7.2 kg per ha, assuming that a reduction in mineral feed phosphates is not counteracted by an increase in the use of mineral fertilizer phosphate or in production. It should be noted that the average annual phosphorus input to soil included 7 kg per ha derived from mineral fertilizer phosphates and 2 kg per ha from sewage sludge (in 2000/2001).

## **B. Turnover and losses of phosphorus at field level**

As phosphorus is a limiting factor for plant growth, it is important to keep soil phosphorus levels sufficiently high to sustain plant growth. Over the last century an estimated 1.4 tonnes phosphorus per ha farmland has accumulated in soil. In the first half of the 20<sup>th</sup> century the addition of phosphorus was justified by the need to meet plant requirements. In 1950 about half of the soil samples analysed thus contained less than the recommended soil phosphorus level. These days less than 10% of samples are below the recommended level and more than 50% above the recommended level. So in 1950 there was still a need to increase soil phosphorus levels on much of the farmland, while in many areas levels today could be decreased without any detrimental effect on yield.

The geographical distribution of soil phosphorus accumulation has changed in line with agricultural development and structural changes. Phosphorus has accumulated particularly in areas with a high livestock density as a result of the imbalance between nitrogen and phosphorus in animal manure, which has been used as an all-round nitrogenous fertilizer in crop production. This development has been exacerbated by the reduction in the relative nitrogen content of animal manure compared with phosphorus. A mapping of livestock production reveals that it is concentrated mainly in intensive production areas in Jutland and on Funen, while this type of husbandry, and thus presumably also phosphorus accumulation, is on the decrease in the rest of the country. This structural development towards a geographical concentration of livestock production has affected phosphorus accumulation in agricultural soils and is bound to increase the risk of environmental losses of phosphorus.

There are three large data sets available where actual measurements of soil phosphorus level, accumulation, saturation and plant availability have been related to region, soil type, etc. These databases are important sources of knowledge on soil phosphorus status and comprise the farmers' analyses of soil phosphorus status, the phosphorus analyses in KVADRATNETTET (A Danish Square Grid), and soil profiles in the Danish Soil Profile Database. None of these datasets can be used for a risk analysis of phosphorus loss in their present form, but can be used in various ways in future work with regional mapping and risk analysis. An analysis of grid points in KVADRATNETTET further shows that farmland on average has a higher concentration of total phosphorus (approx. 4.6 tonnes per ha) than deciduous woodland (approx. 2.7 tonnes total phosphorus per ha) measured to 0.75 m depth. and also a higher level of phosphorus saturation.

### *Agricultural land use and phosphorus losses*

Compared with the countryside in its natural state, agricultural activity will have an effect on the mobilisation and turnover of phosphorus. Runoff conditions and quantities are altered, and so is the soil's ability to accumulate and transport phosphorus. Fertilization and harvesting procedures furthermore have a direct impact on the size of the soil phosphorus pool. Different forms of land use and cropping systems will have different effects on the soil. Soil tillage erosion, particularly on slopes, can thus cause the overland flow of phosphorus-rich surface soil to hollows, hedges or other barriers that are usually closer to water bodies, increasing the risk of loss. Both normal soil tillage and reduced soil tillage will, in different ways, affect soil water transport, and the effect of the different forms of soil tillage on loss of phosphorus is not clear. Reduced soil tillage is, however, ex-

pected to have a smaller impact, particularly with direct drilling of winter seed, as this leaves the surface uneven and gives better conditions for water infiltration.

In terms of plant nutrition, phosphorus in readily soluble mineral fertilizer and animal manure is considered of equal value. It appears though that animal manure phosphorus is more mobile and is more easily transported to deeper soil layers than mineral fertilizer phosphorus. Surface-applied fertilizer can be lost through surface flow on sloping areas, through leaching via macropores to artificial drains or groundwater, or through wind erosion. The regularity of application also has an effect, as large, less frequent applications carry a heavier risk of loss than the same overall amount applied in smaller, but more frequent doses. Patchy applications from, for example, grazing cows and free-range pigs can similarly result in hot spots with large soil phosphorus levels and thus a greater risk of loss.

Sewage sludge is another source of phosphorus in farming and in 1999 approx. 60% of the sewage sludge from sewage treatment works (a total of approx. 3,000 tonnes phosphorus) was applied to farmland, with smaller amounts from private companies. In terms of fertilizer value, phosphorus in sewage sludge may be in less soluble form and less plant-available, particularly where sewage works use iron and aluminium to precipitate solids. However, in the long term this phosphorus can also contribute to the soil phosphorus pool on par with other phosphorus fertilizers. In Denmark the official policy is that application to farmland is the preferred option for the disposal of sewage sludge from an environmental point of view. Some local communities have, however, abandoned the use of the sludge as a fertilizer, partly because there is a fall in demand and partly because the future market for this product in farming is uncertain.

### *Organic productions*

There is generally no reason to assume that there is a significant difference between organic and conventional herds in terms of the utilisation and concentration of phosphorus in animal feeds. However, in organic farming the choice of feedstuffs and additives (such as phytase) is more restricted than in conventional farming, which can affect the content and availability of phosphorus. In organic farming production levels may also be lower, production times are longer and the feed consumption therefore larger, which can result in a higher level of phosphorus excretion per unit produced, particularly in meat production (fattening pigs, chickens, beef cattle), but also in sows and egg-laying hens.

The different management systems practised in organic farming, where a relative larger area is used for perennial crops such as clover, grass and other forages, can reduce the risk of erosion in erosion-vulnerable areas and thus the risk of phosphorus loss. The turnover of phosphorus in organic farming is generally lower than in conventional farming, although the phosphorus surplus can be larger in some situations. This is partly because the yield, and therefore also the phosphorus uptake, is approx. 25% lower than in conventional farming, and partly because of the ban on mineral fertilizer in organic farming resulting in a heavier reliance on animal manure. In organic livestock farming there are stricter regulations on livestock density and nutrient balancing than in conventional livestock farming, which may lead to less phosphorus being applied to land. This is reflected in the

comparatively smaller phosphorus surplus in organic livestock farming. Organic pig farms, however, have a larger phosphorus surplus due to the use of outdoor rearing systems. The conclusion is that there generally is a better phosphorus use efficiency in organic farming and thus less phosphorus lost to the environment, but that the effects are marginal. If the present restrictions on the use of animal feeds and additives are maintained, this could affect the feasibility of reducing in phosphorus content in animal manure in organic farming.

#### *Turnover of soil phosphorus*

Phosphorus is mobilised from soils by water or wind-related processes, but the loss potential is also affected by the phosphorus sorption capacity of the soil and by management-related factors such as plant growth, fertilization regimes and tillage practices. Phosphorus is lost both as dissolved and as particle-bound phosphorus in both organic and inorganic forms. Phosphorus sorbs easily to soil components and only a small proportion of soil inorganic phosphorus is therefore dissolved and readily accessible to plants or can be leached from the root zone. In well-drained soils the soil phosphorus sorption capacity is generally large, but theoretically limited. Soil phosphorus saturation increases in line with the gradual utilization of the phosphorus binding capacity of the soil. In theory, complete saturation is possible, but in practice this is irrelevant, as the so-called critical degree of saturation is reached long before complete saturation takes place. *The critical degree of phosphorus saturation is defined as the point where saturation results in a dissolved phosphorus concentration that has the potential to leach and cause environmental damage.*

The soil accumulation capacity increases in line with the clay, iron and aluminium oxide concentrations and the soil phosphorus sorption capacity varies considerably in Denmark. In mineral soils most of the phosphorus is bound to the clay-rich fraction or to the iron and aluminium oxide coatings on larger particles. In clay-rich soils, phosphorus can be dissolved and P-rich particles can become detached and be transported through cracks and macropores to tile drains, particularly during heavy precipitation events, and thus subsequently to a watercourse. Phosphorus turnover and loss from the very inhomogeneous group of drained wetlands in Denmark is relatively poorly illuminated, which is unfortunate as these areas can be a considerable source of agricultural loss of phosphorus. Phosphorus sorbed to iron compounds in the soil can be mobilised under reducing conditions as a result of water-logging, which may be caused by the establishment of permanent wetlands, by temporarily high water tables, and by poor drainage conditions in local areas.

There is a fundamental link between soil phosphorus status and the risk of phosphorus loss. This has been demonstrated by many individual investigations, where the soil phosphorus status has varied, while the conditions for transport have been identical. The relationship can be illustrated by the fact that far more phosphorus is lost from fertilized agricultural catchment areas than from natural catchment areas. Our knowledge in this area is, however, insufficient for a practical quantification of this relationship. In many situations it is also necessary to include the capacity of the whole soil profile to absorb and release phosphorus and not just the plough layer.

The leaching of phosphorus to drains or groundwater represents the greatest risk of phosphorus loss from soils that are not vulnerable to erosion. Data show that in drained areas, some soils (approx.

10-15%) have high phosphorus losses to drains but it is not yet possible to identify these hotspots. In un-drained soils where leaching of dissolved phosphorus is the largest risk factor, it is important to ensure that phosphorus accumulation does not lead to critical levels of saturation in deeper soil layers, and that water flow and leaching in these soils are properly clarified. Our knowledge here is also inadequate for an identification of risk areas.

### *Agricultural losses of phosphorus*

The national monitoring programme NOVA is a source of knowledge about the loss of phosphorus to the aquatic environment. The loss is divided into non-agricultural sources (background, ground-water, scattered housing, atmospheric deposition and point sources) and the agricultural contribution. The agricultural contribution is the difference between the overall loss of phosphorus and the non-agricultural contributions. The uncertainties associated with the estimation of the non-agricultural contribution are therefore reflected in the determination of the agricultural contribution.

The agricultural contribution can be quantified at the national level using different inputs from NOVA and different methods of upscaling. Depending on the method, the time-scale and the input data used, the contribution from agriculture ranges between 690 and 1300 tonnes phosphorus. The input from agriculture has not changed since the late 1980s and the continued rise in soil phosphorus levels during this period (an average of approx. 200 kg per ha) is thus not reflected in the measured losses. The stability in the size of the agricultural contribution is due to a combination of the considerable uncertainties in the estimates, the large year-on-year variations in leaching levels and the relatively short monitoring period. Whether the 'true' agricultural contribution has changed is therefore uncertain. During the NOVA monitoring period other changes have taken place that may have had an effect – either positive or negative – on diffuse phosphorus losses in catchment areas, such as the wider use of phosphate-free detergents, the introduction of 2-meter wide riparian buffer zones and environmentally friendly management of water bodies, the ban on direct farm discharges, the requirement for fields to have a winter crop cover and the changes in the handling of animal manure.

There is a clear link between the agricultural phosphorus contribution in individual years and the level of water discharge measured, with the agricultural contribution rising in line with increases water discharge. If the average level of rainfall rises in the future, which is the expected effect of climate change in Denmark, then the relative agricultural contribution can also be expected to rise.

It is not possible to accurately split the agricultural contribution into the different sources of loss such as erosion, surface runoff, leaching to drains, contribution from the surface-near groundwater etc. The report estimates the contribution from these different sources. The estimates are based partly on data material from research projects and partly on experiences from the National Aquatic Monitoring and Assessment Programme and all estimates and the bases for their calculation are presented in the report. The overall agricultural contribution based on an estimate of the individual sources is 440 to 1,180 tonnes phosphorus per year – in good agreement with the above NOVA-based estimates. Erosion-based losses are just over 50% of the estimated total losses, with bank erosion by far the largest individual contributor. Leaching from drained wetlands is another substantial

source. For most of these sources there is considerable uncertainty attaching to the estimates as the data material is fairly insubstantial. An estimate at national level will necessarily cover over large local variations and variations between different catchment types. A small contributor at national level may be the main contributor in some catchment areas.

Phosphorus released from the plough layer can be captured or delayed on its path towards a watercourse. Leached phosphorus can be retained in deeper soil layers, if the physico-chemical relationships in the new environment stimulate the capture or precipitation of phosphorus in particulate form. Only a small percentage of the phosphorus lost from fields through wind or water erosion or surface flow will actually reach a watercourse, as much of it will be deposited along barriers in the landscape such as woodlands, hedges, roads, etc. or on level ground in a field if carried in water. Barriers far from a watercourse can affect a more permanent retention of phosphorus than barriers nearer watercourses, such as riparian buffer zones. Protective zones near watercourses are particularly effective at retaining particulate phosphorus; whereas their ability to retain dissolved phosphorus is more uncertain. The more intense the runoff and erosion event, the wider the strip has to be in order to provide adequate protection. Experiments show that 5-10 m wide buffer zones can retain much of the incoming particulate phosphorus, and even 4-5 m wide buffer zones can retain 41-97%. Danish experiments with 2 and 6 m wide buffer zones show a high level of retention, even with the 2 m wide buffer zone, but this is with relatively low mobilizations of phosphorus from above-lying areas. The aquatic system also has the capacity to retain phosphorus, mainly in particulate form and mainly in lakes or in temporarily flooded meadows or river basins. Precipitation of dissolved phosphorus in ochre-rich watercourses can have a significant impact. Flooded low-lying areas, such as river basins, can retain large amounts of particulate phosphorus.

#### *Mapping of risk areas*

Although the agricultural loss of phosphorus to the aquatic environment is relatively small (0.3 to 0.5 kg per ha) compared to the accumulated levels of phosphorus in agricultural soils (an average of 4,700 kg per ha to 75 cm depth) and the annual fertilizer inputs (just over 30 kg per ha), it can nevertheless be critical for the water quality of particularly lakes and fjords. A reduction in the loss of phosphorus from agricultural soils to surface waters therefore means having to reduce a loss that is already only a small fraction of the agricultural soil phosphorus levels.

Phosphorus loss is a complex function of climate, topography, hydrology, soil physical properties, management practices and fertilization regimes. The risk of loss therefore varies in time and space, both at regional, catchment and field level. This also means that some areas contribute significantly more than others to phosphorus loss. Risk areas, called critical source areas in the international literature, are areas where an efficient transport pathway links phosphorus sources in the landscape with a watercourse. The identification of risk areas in the landscape is crucial for effective mitigating measures to be implemented and it should be feasible to do so with great precision and detail, making the initiative more cost-effective both from an environmental and agricultural point of view. Very few international investigations and models are able to identify sources and pathways for phosphorus to watercourses, lakes and fjords into regional or local scales, and none of them are immediately applicable to Danish conditions. It is therefore important to build up the required

knowledge and expertise so that proper tools can be developed to identify risk areas at the relevant scales and under Danish conditions. In this process it is important to determine what the optimal scale is for the risk assessment and also to have any interactions between applied measures evaluated. The reduction in erosion-induced phosphorus losses through improvements in soil water infiltration could, for example, increase the risk of phosphorus losses via leaching.

The ability of the soil to absorb and release phosphorus is pivotal in an overall assessment of phosphorus balances and risk of losses. An assessment will have to include the entire soil profile and the traditional classification of Danish soils according to texture or the very rudimentary distinction between sandy and loamy clay soils is inadequate. The ability of Danish soils to absorb phosphorus has not been mapped but the very important general properties that can contribute to a characterisation of the ability of Danish soils to capture and translocate phosphorus are already available in different databases. It would therefore appear feasible for a research initiative to produce the required foundation for a mapping of the ability of Danish soils to capture and transport phosphorus through the soil profile. This will be particularly relevant for sandy soils and for wetlands where knowledge of the processes affecting phosphorus loss is very sparse. Such a research initiative should therefore include detailed studies that examine the most important aspects of phosphorus loss from these areas.

Leaching of phosphorus in well-drained soils is closely linked with the rapid transport of water through the soil via macropores, often to tile drains, and with how drains are connected to a watercourse. Whether and how drains are installed depends on the soil's natural ability to drain water. Artificial drainage is also an important factor on loamy clay soils, as water transport and water balance affects the distribution of phosphorus in the soil profile and thus also the potential loss of phosphorus. Between 70 and 80% of Danish loamy clay soils have drains installed at 1 m depth. The amount of water ending up in artificial drains normally ranges between 50-90% of excess precipitation with the remainder going to replenish groundwater aquifers. Unfortunately, very little of the information on location and extent of drained areas is in easily available or digital form. DIAS has in the past mapped drainage requirements, and since more detailed information is now available in digital form along with suitable GIS tools available, it should be possible to improve the mapping of drainage requirements and the potential infiltration of excess precipitation. If research succeeds in identifying the areas where leaching to tile drains mainly takes place via macropore flow, the mapping of drainage requirements could probably be extended to include the identification of risk areas for phosphorus loss via tile drains.

Phosphorus losses via erosion and surface runoff are affected particularly by topography, soil type, climate and crop management systems. A mapping of potential erosion risk areas has been carried out using the stationary/permanent parameters of soil erodibility (K), slope length (L) and slope gradient (S). This maps the potential risk, but does not reveal anything about the actual losses in the area through erosion, as this also depends on factors such as climate, management system and land use. The extent of erosion measured in experiments appears to agree well with the modelled KLS values. Areas with KLS values above 85 have therefore been categorised as being at risk of erosion. These areas comprise about 500 km<sup>2</sup> of the total area mapped so far (all of Denmark minus Born-



holm and Funen). The aim of the mapping exercise was to identify potential erosion risk areas near freshwater systems and thus of particular interest in erosion-related matters. The mapping can, however, not be used to precisely identify focus areas for erosion-mitigating efforts. This requires more detailed studies.

### *Mitigation measures*

The report recommends a number of possible measures to reduce agricultural losses of phosphorus to the aquatic environment. These have been divided into two main groups: *General measures* and *Measures for risk areas*. Several of the measures can be combined, but the effects cannot necessarily be summed. The measures have been further subdivided into four categories: (1) *Management measures*, which are actions taken in connection with the daily management of the farm, i.e. choice of tillage methods, fertilization, crops, feeding regimes, etc., (2) *Changes in land use*, which are measures that result in either long-term or permanent changes in land use, (3) *Environmental control*, which includes measures that can be expected to be initiated for groups of farmers in close cooperation between farmers and regulatory authorities or at the initiative of the authorities, and (4) *Production regulation*, which aim to influence and regulate production so that environmental considerations are incorporated into production methods. Several of the measures listed can have a considerable impact on production and structural development.

General measures are initiatives that can be broadly applied and are valid for all farms. Their immediate effect is a reduction in the phosphorus input to soil, whereas the effect on soil phosphorus losses and consequently on the environment will have a longer time frame. Such measures will stop the development of new risk areas and will therefore affect the long-term phosphorus loss potential. General measures do not, however, solve the short-term, acute environmental problems caused by large phosphorus losses to the aquatic environment. The effectiveness of a measure will be location-dependent and influenced by soil properties, proximity to vulnerable water bodies, soil phosphorus status, etc. In order to achieve a significant reduction in soil phosphorus losses using the general measures, phosphorus input to soil will in many areas have to be less than the phosphorus output in crops to give an overall reduction in the soil phosphorus pool. A linkage between soil phosphorus status such as Olsen P and the risk of phosphorus losses has been documented, but the results are insufficient for a quantification of this relationship at broader scales under practical conditions.

Measures adopted in risk areas will probably be limited to specific areas, where they are expected to have a rapid effect on phosphorus loss. Most will also be applied in areas with existing environmental problems (such as lakes and fjords), where there is a need for prompt action. Nearly all of them will in the short term reduce the loss of phosphorus by disconnecting the active transport pathways to the aquatic environment, whereas only few will result in a reduction or discontinuance of phosphorus input to soil.

It is very difficult to quantify the effect of particularly the general long-term measures, as phosphorus loss is a complex process with significant variations in time and space. Neither do we have sufficient knowledge to quantify the phosphorus loss for either a reference area (i.e. an area in its natural state), the excess phosphorus loss associated with farming practices (with associated changes in

hydrology and plant cover) or the additional losses associated with the accumulation of fertilizer phosphorus in the soil. The difficulties in quantifying the loss are further exacerbated by the insignificance of the amounts lost compared with the large quantities of phosphorus that are in circulation in farming. An estimate of the effectiveness of the measures is based on an “all other things being equal” basis. This means, for example, that the long-term effect of reduced phosphorus input to farmland and a better distribution of phosphorus on agricultural land assume there is no change in climate, management, crops, etc. In this connection it is important to be aware that changes in climate, etc. can, on their own, have a larger effect on phosphorus losses than the changes attributed to general measures. If climate changes result in increased rainfall and heavier precipitation events, which is generally assumed, then the risk of phosphorus losses will be considerably increased for all the processes involving water flow (bank and surface erosion, surface runoff and leaching). As the size of the agricultural contribution also varies considerably from year to year and as there are considerable uncertainties associated with the estimation, it may be difficult to register the small but nevertheless genuine reductions in phosphorus losses that will be the result of mitigation measures being implemented.

### **Overall conclusion**

A basic feature of the phosphorus issue in agriculture is that at national or regional level the connection between input and loss of phosphorus only becomes evident in the long term. A reduction in phosphorus input to agricultural soils can thus generally be expected to reveal an environmental effect only in the long term. In the short term, other approaches will have to be adopted that aim at direct and immediate reductions in the loss of phosphorus from high-risk areas.

*The ideal strategy for phosphorus is therefore achieved using general measures to limit phosphorus accumulation and improve the distribution of phosphorus on farmland generally, combined with special initiatives to reduce phosphorus losses from particular high-risk areas (critical source areas).*

# 1. INDLEDNING

*Hanne Damgaard Poulsen, Jørgen F. Hansen, Gitte Holton Rubæk, Jakob Sehested og Arne Kylingsbæk*

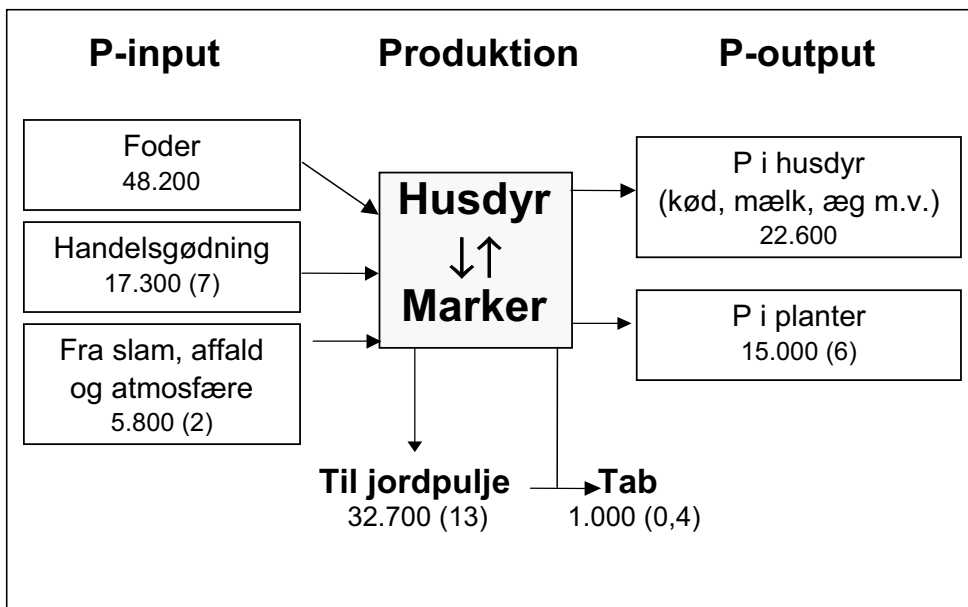
Fosfor er et næringsstof for alle levende organismer og forekommer naturligt i jord, vand, dyr og planter, så fosfor spiller produktions- og sundhedsmæssigt en vigtig rolle for både planter og dyr. Derfor har der været fokuseret meget på, at der i hvert fald ikke skulle mangle fosfor, og manglende viden har ofte ført til, at der har været anvendt en betydelig sikkerhedsmargin i fosfortilførslen. På den anden side er der stigende opmærksomhed på, at overskydende fosfor fra landbruget har negativ betydning for især vandmiljøet, og derfor er der nu også fokus på at begrænse fosfortabet fra landbruget. Reduktion af fosfortabet vedrører især to indsatsområder: 1) Reduktion af det årlige fosforoverskud i dansk landbrug og en bedre fordeling af fosfortilførslerne over det dyrkede areal. 2) Identifikation og særlig indsats mod betydende kildeområder og transportveje for fosfor fra landbrugsarealet til vandmiljøet. Hvert indsatsområde dækker over en række problemstillinger vedrørende husdyr- og planteproduktion, som beskrives i denne rapport.

Forskningsindsatsen inden for fosfor har i de senere år resulteret i ny viden om husdyrenes fosforbehov og givet mulighed for en bedre udnyttelse af foderets fosforindhold og følgelig en reduceret fosforudskillelse i gødningen. I relation til en øget udnyttelse af fosfor mangler der dog fortsat viden om fosforomsætning og -behov hos flere kategorier af husdyr samt om biotilgængeligheden af fosfor i fodermidlerne. Parallelt er der også skabt ny viden om fosforomsætning, -binding og -transport i jord, men der er dog stadig på væsentlige områder et mangelfuldt kendskab til størrelsen af fosfortabet fra landbrugsjorden til vandløb, søer og fjorde, og til hvordan og hvor hurtigt tabet påvirkes af dyrkningsmetoder, gødskningsoverskud m.v. Der eksisterer ikke umiddelbart anvendelige, dynamiske modeller for fosforomsætningen og dermed ikke tilstrækkelig mulighed for modelbaserede konsekvensberegninger af tiltag til reduktion af tabet til overfladevand.

## 1.1 Udvikling i fosforanvendelsen i dansk landbrug

Fosforanvendelsen i landbruget indgår dels i sit eget ”interne” kredsløb, dels i det overordnede fosforkredsløb, hvor stoffet udveksles mellem hav og jord og på sin vej veksler mellem forskellige organiske og uorganiske led i kæden. I figur 1.1 er fosforomsætningen i landbruget skitseret.

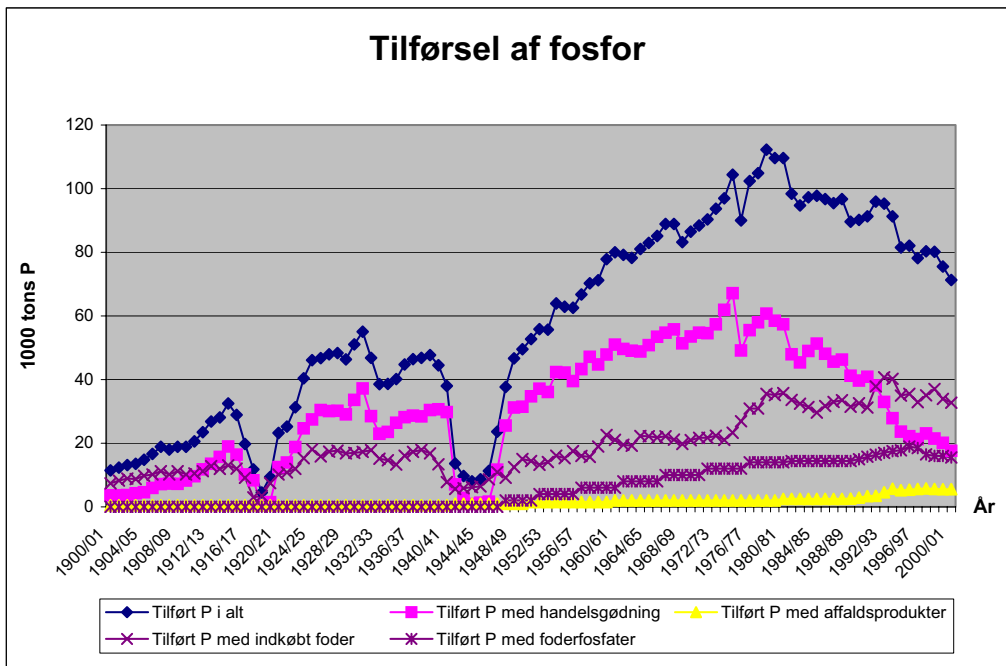
I forbindelse med den øgede og intensiverede produktion i landbruget op gennem sidste århundrede er fosforanvendelsen i landbruget steget væsentligt, idet der er tilført betydelige mængder fosfor med importeret handelsgødning, foder og foderfosfater. Indtil omkring 1980 voksede det årlige fosforoverskud, defineret som ”tilført fosfor fratrukket fosfor bortført med landbrugsprodukter”, men derefter er det årlige overskud faldet. Overskuddet udgør i dag godt 33.000 tons årligt, hvilket svarer til ca. 13,4 kg fosfor pr. ha. I figur 1.2 og 1.3 er vist udviklingen i fosfortilførsel og -fraførsel i landbruget gennem det sidste århundrede.



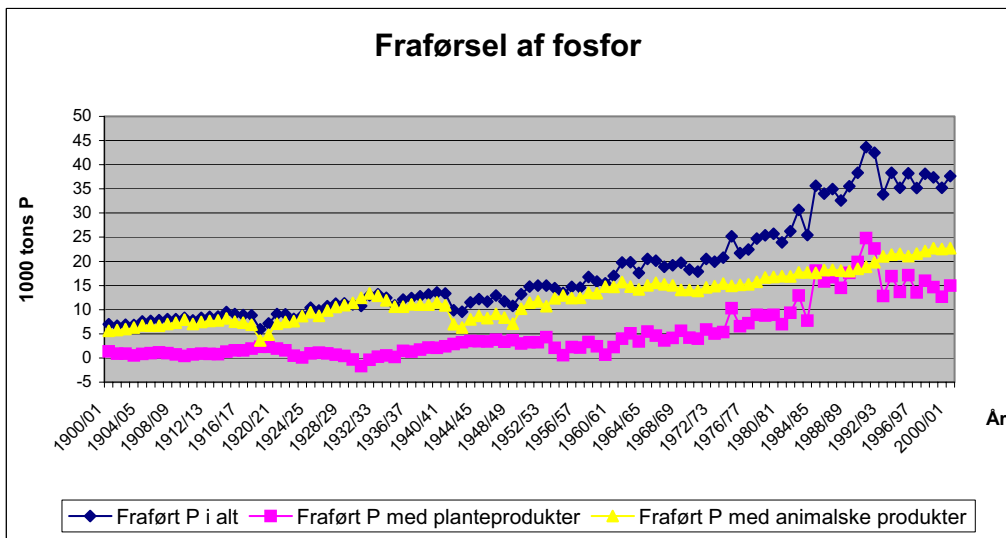
**Figur 1.1** Sektorbalance for fosfor i landbruget år 2000 angivet i tons fosfor i alt og kg fosfor pr. ha i parentes (afrundede værdier). Tilførsel med slam og affald og fra atmosfæren fordeler sig med henholdsvis ca. 5.500 tons og ca. 300 tons. Tabet udgøres af dyrkningsbidraget, hvor opgørelserne varierer fra 690 til 1.300 tons pr. år.

Disse beregninger er behæftede med en vis usikkerhed. Specielt var statistikken tilbage i tiden ikke så omfattende og detaljeret som i dag, hvorfor usikkerheden/fejlen er relativt størst først i perioden. Da princippet for beregningerne så vidt muligt er de samme fra år til år, giver resultaterne dog et rimeligt skøn over udviklingen gennem tiden. Data for tilførsel med handelsgødning og foderstoffer samt fraførsel af produkter er hentet fra Danmarks Statistik, mens oplysningerne om fosfor i affaldsprodukter, som omfatter spildevandsslam, husholdningsaffald og industriaffald, er fra Miljøstyrelsen.

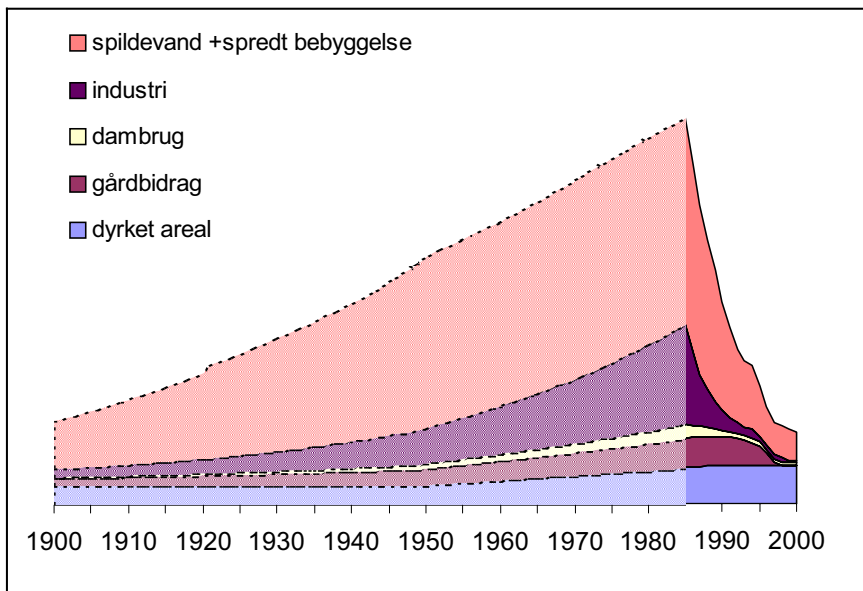
Ikke kun i landbruget, men også i det øvrige samfund, er anvendelsen af fosfor steget gennem det seneste århundrede, og i takt hermed er også udledningerne af fosfor til det omgivende vandmiljø steget. Figur 1.4 viser et bud på udviklingen i fosforudledningerne fra forskellige kilder til vandmiljøet over det seneste århundrede.



**Figur 1.2 Tilførsel af fosfor til landbruget i alt med handelsgødning og affald (inkl. slam) samt med indkøbt foder og foderfosfater i perioden 1900 til 2000 (Kyllingsbæk, 2003).**



**Figur 1.3 Fraførsel af fosfor fra landbruget i alt og fordelt på henholdsvis plante- og animalske produkter i perioden 1900 til 2000 (Kyllingsbæk, 2003).**



**Figur 1.4** Skøn over de årlige udledninger af fosfor til kystvande i Danmark gennem det seneste århundrede. Fra 1985 og fremefter viser figuren de egentlige opgørelser af udledninger på grundlag af overvågningsdata fra NOVA og miljøstyrelsens opgørelse for 1985 (ved igangsætningen af Vandmiljøplan 1). Før 1985 findes der ikke målinger og opgørelser. De stiplede linier angiver derfor en tilbageskrivning i tid af tabet i 1985 baseret på væksten i den industrielle produktion og befolkningsudviklingen samt ud fra en række antagelser, f.eks. at dyrkningsbidraget i år 1900 udgjorde 50% af det aktuelle dyrkningsbidrag. (Modificeret efter Rüegg & Østergaard, 2002).

Først fra 1985 foreligger der egentlige opgørelser over de forskellige tab. Tilbage i tiden er udviklingen i tabet fra f.eks. industri og husholdning beregnet som en tilbageskrivning af tabet i 1985. Dette er blandt andet sket på basis af væksten i den industrielle produktion og på befolkningsudviklingen. Vedrørende dyrkningsbidraget, har man antaget, at dette udgjorde 50% af det nuværende dyrkningsbidrag fra 1900 og frem til 1950, hvorefter det er sat til at stige jævnt frem til 1990 (Rüegg og Østergaard, 2002). Grundlaget for opgørelsen er således i sagens natur meget spinkelt specielt for perioden før 1985, men figuren tjener til at anskueliggøre den relative udvikling i tabet fra de forskellige kilder for fosfor. De samlede udledninger til kystvande i Danmark i 1985 er anslået til at være knap 13.000 tons fosfor. I år 2000 var udledningerne faldet til knap 2.500 tons. Dette drastiske fald gennem de seneste ca. 15 år skyldes den store indsats mod fosforudledninger fra punktkilder såsom spildevand og industri.

## 1.2. Fosfor i den animalske produktion

Forholdet mellem landbrugsareal og husdyr er på mange måder af væsentlig økonomisk og miljømæssig betydning i Danmark, hvor landbrugsarealet er begrænset og husdyrtætheden høj. Forholdet reguleres da også gennem bl.a. harmoniregler, som har fokus på jordens tilførsel af næringsstoffer

med husdyrgødningen, og blandt andet derfor er reduktion af husdyrgødningens fosforindhold interessant.

Da fosfor er et livsnødvendigt næringsstof skal foderet til husdyr indeholde fosfor. Hovedparten af det fosfor, der findes i dyrekroppen, er aflejret i knoglerne sammen med calcium. Resten findes i en lang række stoffer, som har betydning for energiomsætning, celledeling, cellestruktur m.v. Fosfor har derfor både strukturel og stofskiftemæssig stor betydning. Fosformangel kan medføre nedsat produktion og sundhed og i grelle tilfælde svage knogler med brud til følge. Fosfor spiller derfor både en produktions- og sundhedsmæssigt vigtig rolle, og det er nødvendigt, at husdyrene får tilstrækkeligt med fosfor til dækning af deres fysiologiske betingede behov.

På grund af et mangelfuldt kendskab til husdyrenes nøjagtige behov og til fosforets biotilgængelighed i foder og mineralske foderfosfater, har det tidligere været almindelig praksis at anvende en stor sikkerhedsmargin ved tildelingen af fosfor. Der er derfor mulighed for at reducere husdyrenes fosforudskillelse og samtidig øge deres fosforudnyttelse gennem fodringsmæssige tiltag, men i flere tilfælde kræver dette et bedre vidensgrundlag. Disse tiltag kan være at reducere sikkerhedsmargin (hvilket øger risikoen for underforsyning af dyrene), at fodre præcist efter dyrenes fysiologiske behov (dækket af tilgængeligt fosfor i foderet), at øge biotilgængeligheden af det naturligt forekommende fosfor (vha. tilsætning af fytase mv.) og at anvende fosfatkilder med høj tilgængelighed i foderet. Der har været stigende forskningsaktivitet vedr. det fysiologiske fosforbehov og vedrørende biotilgængeligheden af fosfor i foderstoffer og mineralske foderfosfater, først inden for svin og senere inden for kvæg og fjerkræ. Disse aktiviteter har hos flere husdyrarter og kategorier (inden for husdyrart) medført ændringer og tilpasninger i fodringsanbefalinger, hvilket er sket i takt med, at der er fremkommet ny, dokumenteret viden.

Der er dog stadigvæk muligheder for at mindske fosforindholdet i husdyrgødningen, men det kræver indgående kendskab til fosforomsætningen og dyrenes præcise fysiologiske behov for fosfor, og hvilke faktorer, der påvirker behovet. Desuden er det vigtigt at have kendskab til indholdet og tilgængeligheden af fosfor i foderstoffer og –fosfater, og hvilke faktorer, der påvirker disse. Det drejer sig om at tilpasse foderets indhold af tilgængeligt fosfor til husdyrenes behov og at minimere andelen af utilgængeligt fosfor. Tilgængeligheden er en “dark horse” i dette spil, fordi der mangler viden om tilgængeligheden, og dermed også om mulighederne og begrænsningerne for at påvirke denne, ikke mindst fordi den eksisterende viden viser, at tilgængeligheden varierer meget. Især hos enmavede dyr spiller foderets indhold af fytat en stor rolle for tilgængeligheden af foderets fosforindhold, og derfor er afdækning af de fodringsmæssige og teknologiske muligheder for øget udnyttelse af fytatbundet fosfor et væsentligt emne. Det er også vigtigt at være opmærksom på mulighederne for at udmønte den mere præcise viden i den praktiske fodring, idet det sjældent er muligt at fodre dyrene individuelt i forhold til deres fysiologiske behov.

Reduktion af fosforudskillelsen hos husdyrene uden negative konsekvenser for produktion og sundhed forudsætter imidlertid som tidligere nævnt, at foderets fosforindhold reduceres samtidigt med, at fosforudnyttelsen øges.

### 1.3 Fosfor i planteproduktionen

Fosfor er også et nødvendigt næringsstof i planteproduktionen. Fosfor optages hovedsageligt i planterne som opløst uorganisk fosfor (orthofosfat), og optagelsen sker fra jordvæsken. Kun en lille del af det gødningsfosfor, der tilføres det enkelte år, vil være tilgængelig for afgrøden i den indeværende vækstsæson. Resten indgår i jordens fosforpulje, ligesom planternes resterende fosforbehov også dækkes via jordens puljer. Fosfor i jorden er karakteriseret ved en betydelig grad af immobilitet. Den meget lille fraktion, som er opløst i jordvæsken medfører, at planterødderne i vid udstrækning må "vokse" efter fosforet. Afgrødens fosforforsyning er således ikke kun et spørgsmål om tilstrækkelige mængder tilgængeligt fosfor, men kan for eksempel også være afhængig af, hvor godt et rodnet afgrøden formår at etablere og fosforets placering i forhold til planten. Planterarters og -sorters rodnet varierer betydeligt i form, dybde og forgrenethed. Nogle sorter kan f.eks. forbedre deres evne til at optage fosfor ved at lave flere og længere rodhår. Andre er mere eller mindre afhængig af alliancer med svampe (mychorriza), som kan fremme planters fosforoptagelse, især hvis de skal klare sig i jorde med lav fosforstatus. Andre arter, især bælgplanter, kan ved forsuring og udskillelse af rodexudater bidrage til opløsningen af fosfor bundet til jorden i umiddelbar nærhed af roden. Disse forhold har især betydning for planters fosforforsyning på jorde med lav fosforstatus.

I langt de fleste situationer er jordens naturgivne indhold af tilgængeligt fosfor ikke tilstrækkeligt til at understøtte intensiv planteproduktion. Derfor har man tilstræbt at opbygge jordens fosforpuljer via gødsning til et niveau, hvor fosfor ikke begrænser afgrødens vækst. De mængder fosfor, der er tilført store dele af landet gennem de senere årtier som følge af den intensive husdyrproduktion, ofte kombineret med fortsat brug af handelsgødningsfosfor, har gjort, at indholdet af fosfor i jorden mange steder er væsentligt højere, end der kræves for optimal dyrkning. Jordens evne til at forsyne planterødderne med fosfor angives i Danmark ved fosfortallet, hvor en enhed er 1 mg fosfor pr. 100 g jord. Ved fosfortal på 2 - 4 anbefaler Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret, at der tilføres samme mængde fosfor, som afgrøden bortfører (Knudsen, 1997). Ved lavere fosfortal anbefales det at tilføre mere, end der bortføres, og ved fosfortal højere end 4 anbefales en mindre tilførsel end bortførslen. Ved tal så lave som 1 kan der ud fra et planteernæringssynspunkt med fordel tilføres store mængder på én gang, men det harmonerer ikke nødvendigvis med hensynet til risiko for tab. Ved fosfortal over 6 kan tilførsel undlades i nogle år. Hvor hurtigt fosfortallet vil falde, når fosforgødsning udelades på sådanne jorde vides ikke præcist og bør belyses nærmere.

Gennemsnitligt bortføres omkring 20 kg fosfor pr. ha pr. år med afgrøderne. Afgrødernes fosforbortførsel varierer dog betydeligt alt efter afgrødetype, jordtype og andre vækstforhold. Generelt har kornafgrøder det laveste fosforforbrug og bælgplanter samt grovfoderafgrøder, herunder også majs, det højeste.



## 2. FOSFOROMSÆTNING OG -UDNYTTELSE HOS HUSDYR

### 2.1 Husdyr og fosfor

*Hanne Damgaard Poulsen, Jakob Sehested og Karoline Johansen*

Det er nødvendigt, at foderet til husdyr indeholder fosfor, idet mineralet er et livsnødvendigt næringsstof. Hovedparten af det fosfor, der findes i dyrekroppen, er aflejret i knoglerne sammen med calcium. Resten findes i en lang række stoffer, som har betydning for energiomsætning, celledeling, cellestruktur m.v. Fosfor har derfor både strukturelt og stofskiftemæssigt stor betydning. Fosformangel kan f.eks. medføre nedsat tilvækst og produktion og i grelle tilfælde svage knogler med brud til følge. Fosfor spiller således både produktions- og sundhedsmæssigt en central rolle, og det er vigtigt, at husdyrene får tilstrækkeligt med fosfor til dækning af deres fysiologisk betingede behov. Derfor har der været fokuseret meget på, at vores husdyr i hvert fald ikke skulle mangle fosfor. På den anden side er der stigende opmærksomhed på, at overskydende fosfor fra husdyrproduktionen har negativ betydning for især vandmiljøet, og der er fokus på at begrænse fosforindholdet i husdyrgødning.

Husdyrene får dækket fosforbehovet gennem fodringen, og indholdet af fosfor i foderet stammer for en stor del fra foderstoffernes naturlige indhold. Da dette på grund af for lavt indhold og/eller lav biotilgængelighed ikke altid dækker dyrenes behov, bruges foderfosfater (mineralsk fosfat) til at øge fosforindholdet i foderet. Tidligere blev der også brugt kødbenmel som alternativ til foderfosfat, men efter udbruddet af BSE (kogalskab) er dette ophørt. Med henblik på at begrænse husdyrenes fosforudskillelse drejer det sig derfor om at udnytte foderstoffernes naturlige fosforindhold bedst muligt, hvorved behovet for tilskud af mineralsk fosfat begrænses mest muligt.

Kapitel 2 har til formål at afdække mulighederne for at reducere fosfortildelingen og øge fosforudnyttelsen hos husdyrene uden at kompromittere husdyrenes produktion og sundhed.

### 2.2 Fosforindhold i husdyrgødning – status og udvikling over de seneste 20 år

*Hanne Damgaard Poulsen og Jakob Sehested*

#### 2.2.1 Fosforudskillelsen på enkeltdyrsniveau

I dette afsnit beskrives udviklingen i indhold af fosfor i gødningen *ab dyr* for de enkelte husdyrarter for perioden 1985 til 2002 (se tabellerne 2.1, 2.3, 2.5 og 2.7). Der omtales svin, kvæg, fjerkræ og pelsdyr, som repræsenterer henholdsvis 53, 37, 5 og 4% af fosforindholdet i husdyrgødning (Poulsen et al., 2001). Tallene vedr. husdyrgødningens fosforindhold i 1996 og 2000 er fra Poulsen & Kristensen (1997) samt Poulsen et al. (2001). For årene 1985, 1990 og 2002 er fosforudskillelsen beregnet efter de samme principper. Ved beregningerne er der anvendt baggrundsdata, som bedst muligt afspejler situationen i praksis. Beregningen af fosforudskillelsen sker vha. ligningen: [fosfor i foderet (tilført fosfor)] – [aflejret fosfor i kød/mælk/æg] = [fosfor i gødning]. Da fosformængden, der aflejres ved en given produktion, stort set er konstant, vil den mængde fosfor, der optages med foderet, reflekteres i gødningens indhold. Den mængde fosfor, der gives med foderet, afhænger dels

af foderets fosforindhold (g fosfor pr. kg) og dels af den mængde foder (kg foder), der kræves for at producere f.eks. 1 kg kød eller 1 kg mælk dvs. dyrenes foderforbrug.

### Svin

Tabel 2.1 viser udviklingen i det beregnede indhold af fosfor i svinegødning i perioden 1985-2002 samt indhold pr. dyreenhed.

**Tabel 2.1 Beregnet gennemsnitlig fosformængde i gødningen fra svin i perioden 1985 til 2002**

	1985	1990	1996	2000	2002	2002 kg/DE
Smågris (fravæ.-30 kg), kg/dyr	-	-	0,19	0,18	0,15	26,3
Slagtesvin (30 kg- slagtning), kg/dyr	1,05	1,03	0,69	0,72	0,62	22,3
Årsso, inkl. grise til frav., kg/dyr/år	-	-	7,1 <sup>2)</sup>	7,3	6,63	28,5
Årsso, inkl. grise til 30 kg, kg/dyr/år	11,3	11,7	11,4	11,2	10,1	-
Pr. produceret slagtesvin, kg <sup>1)</sup>	-	-	1,22	1,25	1,08	-

<sup>1)</sup> Slagtevægten er steget fra 98 til 102 kg i perioden.

<sup>2)</sup> Ny opgørelsesmetode.

Det fremgår af tabel 2.1, at der midt i 1990'erne skete en markant reduktion i fosforudskillelsen fra primært slagtesvin, hvilket skyldes ibrugtagning af nye fodringsnormer for fosfor til slagtesvin og smågrise. De nye fodringsnormer blev nu angivet i g fordøjeligt fosfor pr. kg foder i stedet for i g totalfosfor pr. kg foder (se tabel 2.14). Det skete bl.a. på basis af forskningsresultater vedrørende fordøjeligheden af fosfor i fodermidler og mineralske fosforkilder (f.eks. Eeckhout & De Paepe, 1994; Poulsen, 1995), som dannede basis for en værdisætning af fosfor i foderet og i de anbefalede fodringsnormer for fosfor. Denne ændring medførte, at tilsætning af mineralisk foderfosfat i foderet til slagtesvin blev reduceret markant, hvilket kom til udtryk i en væsentlig reduktion i udskillelsen af fosfor. Samme princip er senere også indført for søer. Stigningen i udskillelsen fra 1996 til 2000 skyldes metodeskift ved fastlæggelsen af foderets fosforindhold, og at søernes foderforbrug er steget. Siden år 2000 er der sket en nedgang i udskillelsen af fosfor hos alle kategorier af svin, hvilket er sket pga. stigende anvendelse af tilsætning af fytase kombineret med reduceret tildeling af mineralisk fosfat men også grundet forbedret foderudnyttelse, produktivitetsstigning mv. Det kan eksempelvis nævnes, at antallet af producerede smågrise pr. årsso er steget fra ca. 18 midt i 80'erne til 23 i 2002.

Den beregnede udskillelse af fosfor hos søerne er ret konstant over årene, selv om der er sket en markant stigning i antal producerede grise i den samme periode. Dette betyder sammenlagt, at den totale udskillelse af fosfor pr. produceret slagtesvin (inkl. bidrag fra soen og smågriseperioden) er faldet markant med omkring 12% i perioden fra 1996 til 2002. I samme periode er vægten ved slagtning steget fra 98,3 til 102 kg, hvilket betyder, at reduktionen i fosforudskillelsen pr. kg produceret gris svarer til 15%.

Hvis fosforudskillelsen for de enkelte dyregrupper standardiseres til dyreenheder og sættes i forhold til de gældende harmonikrav på 1,4 DE pr. ha (Bekendtgørelse nr. 604 af 15. juli 2002 fra Miljømi-

nisteriet), så er den aktuelle (2002-niveau) gennemsnitlige udskillelse af fosfor med husdyrgødningen pr. ha som vist i tabel 2.2.

**Tabel 2.2 Beregnet fosforudskillelse fra svin ved 1,4 DE pr. ha**

	Årssøer	Smågrise	Slagtesvin
Fosforudskillelse, kg/ha	40	36	31

Ifølge Danmarks Statistik, 2002 var husdyrtætheden på svinebedrifter gennemsnitligt 2,0 DE pr. ha i 2001. Der var dog stor variation mellem de enkelte amter. Det skal nævnes, at der ved Danmarks Statistiks beregning er brugt den gamle dyreenhedsdefinition. Tallet indikerer, at der er indgået gylleaftaler.

#### Kvæg

Tabel 2.3 viser, at den gennemsnitlige udskillelse af fosfor pr. årsko steg fra 1985 til 1996, hvorefter den faldt markant i 2000 efter reduktion af fodringsnormen for fosfor i 1997.

**Tabel 2.3 Beregnet gennemsnitlig fosformængde i gødningen fra kvæg i perioden 1985 til 2002. Tung race er brugt som eksempel, idet udviklingen er parallel for Jersey**

	1985	1990	1996	2000	2002
Malkeko, kg P/årsko	19,9	22,7	23,0	20,2	20,8
- Kg P/DE <sup>1)</sup>	16,9	19,3	19,6	17,2	17,7
- Kg mælk/årsko	6300	7100	7500	7659	8243
- P/kg produceret mælk, g	3,2	3,2	3,1	2,6	2,5
Opdræt (0-28 mdr.), kg/årsdyr	-	-	5,9	5,9	5,9
Ungtyre, kg/produceret enhed	-	-	7,3	7,3	7,3

<sup>1)</sup> Beregnet for alle årene vha. den nugældende definition (1 årsko = 0,85 DE).

Da mælkeydelsen samtidig er steget markant, betyder det, at fosforudskillelsen pr. kg produceret mælk er faldet markant i perioden (godt 20%). Udskillelsen af fosfor fra opdræt er tilsyneladende konstant. Dog mangler der data for fosforindhold i foder til kvier før 1996. Der er nu anbefalet en ny og reduceret fodringsnorm for fosfor til malkekøer, som indebærer et potentiale for yderligere reduceret udskillelse fremover (Aaes & Sehested, 2003).

Hvis fosforudskillelsen for de enkelte dyregrupper standardiseres til dyreenheder og sættes i forhold til de gældende harmonikrav (Bekendtgørelse nr. 604 af 15. juli 2002 fra Miljøministeriet), så er den aktuelle (2002-niveau) gennemsnitlige udskillelse af fosfor med husdyrgødningen pr. ha som vist i tabel 2.4.

**Tabel 2.4 Beregnet fosforudskillelse fra kvæg pr. ha i 2002 ved henholdsvis 1,7 og 2,3 DE pr. ha. Der er vist gns. af tung race og Jersey, idet udskillelsen pr. DE er næsten ens**

	Tæthed	Malkekøer	Opdræt	Ungtyre
	1,7 DE/ha	30	30	38
Fosforudskillelse, kg/ha	2,3 DE/ha	41	41	52

Bortførslen af fosfor med afgrøderne på et kvægbrug er i størrelsesordenen 20 til 27 kg fosfor pr. ha og afhænger af sædskiftet, jordens bonitet og en række andre faktorer (Knudsen, 1998). Ifølge Danmarks Statistik (2002), var den gennemsnitlige husdyrtæthed på alle kvægbrug 1,5 DE pr. ha i 2001. Clausen (upubliceret) fandt på baggrund af oplysninger fra driftsregnskaber fra 38% af kvægbrugene i 2000, at 55% af bedrifterne havde mindre end 1,7 DE pr. ha, mens 31% havde mellem 1,7 og 2,3 DE pr. ha, og 14,3% havde mere end 2,3 DE pr. ha.

#### Fjerkræ

Tabel 2.5 viser, at fosforudskillelsen fra fjerkræ har været stort set uforandret siden år 2000. At der ses en stigning fra 1996 til 2000 skyldes, at den gennemsnitlige produktionsalder for slagtekyllinger steg.

**Tabel 2.5 Beregnet gennemsnitlig fosformængde i gødningen fra fjerkræ 1996 til 2002**

	1985	1990	1996	2000	2002	2002 kg/DE
Slagtekyllinger, kg/1000 stk. <sup>1)</sup>	-	-	8,5	10,2	10,2	29,6
Æglæggende høner (bur), kg/100 stk.	-	-	21,7	21,4	21,4	36,4

<sup>1)</sup> Slagtealderen var i 1996 39 dage og i de efterfølgende år 40 dage.

Hvis fosforudskillelsen fra kyllinger og høner standardiseres til dyreenheder og sættes i forhold til de gældende harmonikrav (Bekendtgørelse nr. 604 af 15. juli 2002 fra Miljøministeriet), så er den aktuelle (2002-niveau) gennemsnitlige udskillelse af fosfor med husdyrgødningen pr. ha som vist i tabel 2.6.

**Tabel 2.6 Beregnet fosforudskillelse fra kyllinger og høner pr. ha ved henholdsvis 1,4 og 1,7 DE pr. ha (2002-niveau)**

	Tæthed	Slagte- kyllinger <sup>1)</sup>	Høner (bur)	Høner (fritgående)
Fosforudskillelse, kg/ha	1,4 DE/ha <sup>2)</sup>	41	51	59
	1,7 DE/ha <sup>2)</sup>	50	62	71

<sup>1)</sup> Tilnærmelsesvis uafhængig af slagtealder pga korrektion ved beregning af DE. Dog højere udskillelse for skrabekyllinger.

<sup>2)</sup> Harmonikravet er 1,7 DE pr. ha indtil 1. august 2004. Herefter 1,4 DE pr. ha.

#### Pelsdyr

Tabel 2.7 viser, at fosforudskillelsen fra pelsdyr er steget lidt i perioden fra midt i 1990'erne og indtil nu. Samtidig er antallet af hvalpe pr. årsdyr også steget, hvorved udskillelsen pr. produceret skind stort set er konstant.

**Tabel 2.7 Beregnet gennemsnitlig fosformængde i gødningen fra pelsdyr (mink) 1996 til 2002**

	1985	1990	1996	2000	2002	2002 kg/DE
Årsdyr inkl. hvalpe, kg/dyr/år	-	-	0,90	1,03	1,03	45,3

Hvis fosforudskillelsen for pelsdyr standardiseres til dyreenheder og sættes i forhold til de gældende harmonikrav (Bekendtgørelse nr. 604 af 15. juli 2002 fra Miljøministeriet), så er den aktuelle (2002-niveau) gennemsnitlige udskillelse af fosfor med husdyrgødningen ved 1,7 DE pr. ha (harmonikrav indtil 1. august 2004) og ved 1,4 DE pr. ha (harmonikrav efter 1. august 2004) som vist i tabel 2.8.

**Tabel 2.8 Beregnet fosforudskillelse fra mink ved henholdsvis 1,4 og 1,7 DE pr. ha (2002-niveau)**

	Tæthed	Mink
Fosforudskillelse, kg/ha	1,4 DE/ha <sup>1)</sup>	63
	1,7 DE/ha <sup>1)</sup>	77

<sup>1)</sup> Harmonikravet er 1,7 DE pr. ha indtil 1. august 2004. Herefter 1,4 DE pr. ha.

### 2.2.2 Det samlede fosforindhold i husdyrgødning på landsplan (1985-2002)

Den samlede udskillelse af fosfor med husdyrgødningen på landsplan for perioden 1985 til 2002 er vist i tabel 2.9. Heri indgår knap 6.000 tons fosfor, som afsættes, når dyrene græsser. Denne mængde er konstant over årene, og langt den væsentligste del stammer fra kvæg, idet den mængde, der stammer fra svin, er 0 indtil 1994 og stiger til 300 tons i perioden 1995 til 2002. Andet dyrehold bidrager under afgræsning med gennemsnitligt 400 tons fosfor årligt i hele perioden fra 1985 til 2002.

**Tabel 2.9 Beregnet fosforudskillelse af dyr i perioden 1985 til 2002 (Poulsen & Kristensen, 1997; Poulsen et al., 2001)**

Fosfor <sup>1)</sup>	1985	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
<b>Samlet fosforudskillelse</b>																
Total, stald	52	50	50	49	49	49	49	48	49	49	49	50	49	49	46	47
På græs	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
I alt	58	56	56	55	55	55	55	54	55	55	55	56	55	55	52	52
<b>Fordelt på</b>																
Kvæg	30	27	27	27	27	25	25	26	25	25	24	23	22	22	21	20
Svin	23	23	23	23	23	24	24	23	25	25	27	28	28	29	25	26
Andet	5	6	6	5	5	6	6	5	5	5	4	5	5	4	6	6

<sup>1)</sup> 1.000 tons.

Det fremgår af tabellen, at omkring 90% af det fosfor, der udskilles, findes i husdyrgødning afsat i stalden, og at mængden, der afsættes på græs andrager ca. 10%. Det fremgår, at kvæg og svin er de store bidragsydere på landsplan, og at de andre produktioner i perioden 1985-2000 gennemsnitligt bidrager med i alt 7-9% af den samlede mængde fosfor i dansk husdyrgødning. Tabellen viser endvidere, at husdyrgødningens samlede indhold af fosfor er faldet med omkring 10% i perioden fra midt i 1980'erne og frem til nu. Dette fald er sket til trods for en øget animalsk produktion, der især skyldes en markant stigning i antallet af producerede slagtesvin (fra ca. 15 til 22 mio. pr. år (Andersen et al., 2001)). Derimod er mælkeproduktionen reguleret gennem kvote, og det har betydet en nedgang i antallet af malkekøer i løbet af perioden (fra 900.000 til knap 700.000 (Andersen et al., 2001)), da mælkeydelsen pr. ko er steget. Det fremgår også af tabellen, at der er sket et markant fald i bidraget fra kvæg fra 52 til 38%, hvorimod det relative bidrag fra svineproduktionen er steget fra 40 til 50% (2000-niveau). Dette betyder, at svineproduktionen aktuelt bidrager med omkring 50%

af fosforindholdet i husdyrgødning, kvæg med 38% og andre husdyrarter med omkring 12% af det samlede indhold af fosfor afsat i stald og under græsning.

### 2.2.3 Fosforindhold i foder og husdyrenes udnyttelse af det tilførte fosfor

Data for mængden af fosfor tilført med foderet og fosfor aflejret i dyrene og produkterne er anvendt som grundlag for beregning af fosforudskillelsen i gødningen og for beregning af fosforudnyttelsen. Tabel 2.10 viser nogle af disse nøgletal for en række husdyrkategorier (2000-niveau).

**Tabel 2.10 Tilført fosfor med foderet, aflejret og udskilt fosfor samt fosforudnyttelsesgraden hos udvalgte husdyrkategorier i 2000 (efter Poulsen et al., 2001)**

Husdyrart/-kategori	Tilført med foder, kg	Aflejret, kg	Udskilt i gødning, kg	Udnyttelsesgrad, % af tilført
1 årssø + grise til fravæning	8,4	1,13	7,3	13
1 smågris (frav.- 30 kg)	0,30	0,12	0,18	40
1 slagtesvin (30-slagting)	1,11	0,39	0,72	35
1 årsko, tung race	27,9	7,7	20,2	28
1 årsopdræt, tung race	7,7	1,8	5,9	23
1 ungtyr, tung race	10,4	3,1	7,3	29
1000 slagtekyllinger <sup>1)</sup>	23,1	13,1	10,2	57
100 æglæggende årshøner <sup>2)</sup>	27,3	5,9	21,4	22
1 årstæve (mink),	1,08	0,05	1,03	5

<sup>1)</sup> Slagtes ved 40 dage.

<sup>2)</sup> Konsumægshøner.

Tabellen viser, at der er stor variation i udnyttelsesgraden af fosfor, som varierer mellem 5 og 57%. Det fremgår, at slagtekyllinger har den højeste udnyttelsesgrad på knap 60%, hvorimod den beregnede udnyttelse af fosfor er meget lav hos mink. Det er gennemgående, at udnyttelsesgraden er lavest hos moderdyrene og størst hos slagtedyrene.

### 2.2.4 Forbrug af mineralske fosfater i husdyrfoder

Der er ofte kun begrænset variation i det naturlige fosforindhold inden for fodermidler, men stor variation imellem fodermidler. Ud over det naturlige indhold af fosfor i fodermidlerne kan det være nødvendigt at supplere med mineralsk fosfat (foderfosfat) for at tilgodese dyrenes fysiologiske fosforbehov. Det samlede forbrug af foderfosfater er opgjort til 15.500 tons fosfor i 2000/01 (Kyllingsbæk, personlig meddelelse), hvilket udgør ca. 28% af den samlede fosforudskillelse i husdyrgødningen på landsplan (tabel 2.9). Den samlede mængde fosfor i indkøbte fodermidler er opgjort til 48.200 tons fosfor (figur 1.1), hvoraf importeret oliefrø udgør 35, foderfosfat 32, fiskeprodukter 20, importeret korn og kornprodukter 6 og andre foderstoffer 7% (Kyllingsbæk, personlig meddelelse). Til sammenligning er forbruget af handelsgødningsfosfor opgjort til 15.800 tons for året 2000/01 (Kyllingsbæk, personlig meddelelse), hvilket ligger på niveau med forbruget af mineralsk foderfosfat.

I forbindelse med dette udredningsarbejde er det ud fra normtallene for fosforindhold i foder til svin, kvæg og fjerkræ forsøgt at beregne det forventede aktuelle forbrug af foderfosfat samt fordelingen af forbruget på de tre husdyrarter. Det samlede forbrug er beregnet til 17.800 tons fosfor,

hvilket fordeler sig med 64, 25 og 11% på henholdsvis svin, kvæg og fjerkræ (beregningerne er sket i samarbejde med Per Tybirk, Landsudvalget for Svin, Ole Aaes, Dansk Kvæg og Henrik Bang Jensen, Det Danske Fjerkræraad). Det fremgår, at beregningen af det forventede forbrug giver en mængde, der nogenlunde ligger på niveau med Kyllingsbæks opgørelse, som er baseret på forespørgsel hos de største foderproducenter. Heri er formentlig ikke medtaget den mængde fosfor, som indgår i bl.a. importeret færdigfoder samt foder og foderfosfater, som sælges af andre firmaer/importører.

## **2.3 Muligheder for at reducere indholdet af fosfor i husdyrgødningen**

*Jakob Sehested, Karoline Johansen og Hanne Damgaard Poulsen*

### **2.3.1. Generelle indsatsområder**

Fosfor er et livsnødvendigt næringsstof for alle levende organismer. Derfor er det vigtigt, at foderet indeholder tilstrækkeligt fosfor til at dække husdyrenes fysiologisk betingede behov. Dette dækkes gennem absorption af biotilgængeligt (fordøjeligt) fosfat fra mavetarmkanalen. På grund af et mangelfuldt kendskab til husdyrenes nøjagtige behov og til fosfors biotilgængelighed i foder og mineralske foderfosfater har det tidligere været almindelig praksis at tilsætte foderet så meget foderfosfat eller andre fosfatkilder, så man var sikker på, at husdyrenes behov blev dækket – dvs. sikkerhedsmargenen har været stor. Siden midt i 90'erne har der dog været stigende fokus på at reducere husdyrenes fosforudskillelse og samtidig øge deres fosforudnyttelse gennem fodringsmæssige tiltag. Disse tiltag kan være at reducere sikkerhedsmargenen, at fodre præcist efter dyrenes fysiologiske behov, at anvende fosfatkilder med høj tilgængelighed i foderet og at øge biotilgængeligheden af det naturligt forekommende fosfor. Udskillelsen kan dels være et overskud, altså en overforsyning i forhold til behovet, og dels en ufordøjelig rest fra foderet, som dyret ikke kan udnytte. Der har været stigende forsknings- og forsøgsaktivitet vedr. det fysiologiske fosforbehov og vedrørende biotilgængeligheden af fosfor i foderstoffer og mineralske foderfosfater, først inden for svin og senere inden for kvæg og fjerkræ. Disse aktiviteter har hos flere husdyrarter og -kategorier (inden for husdyrarten) medført ændringer og tilpasninger i fodringsanbefalinger, hvilket sker i takt med, at der fremkommer ny dokumenteret viden. Da fosformangel kan resultere i nedsat sundhed og produktion, forudsætter ændringer/tilpasninger, at der ligger faglig dokumentation bag initiativerne. Fosformangel ses som nedsat tilvækst, mælke- og ægproduktion, forringet reproduktion og manglende knoglestyrke, hvilket kan medføre bløde knogler og knoglebrud.

Der er dog stadigvæk muligheder for at mindske fosforindholdet i husdyrgødningen, men det kræver indgående kendskab til en række forhold. For det første er det vigtigt, at man for de enkelte husdyrarter har kendskab til, hvordan fosfor optages, omsættes, aflejres og reguleres. Desuden er det vigtigt, at man kender dyrenes præcise fysiologiske behov for fosfor, og hvilke faktorer, der påvirker behovet. Som den tredje faktor er det vigtigt at have kendskab til indholdet og tilgængeligheden af fosfor i foderstoffer og –fosfater, og hvilke faktorer, der påvirker disse. Det drejer sig om at tilpasse foderets indhold af tilgængeligt fosfor til husdyrenes behov og at minimere andelen af utilgængeligt fosfor. Tilgængeligheden er en "dark horse" i dette spil, fordi der mangler viden om tilgængeligheden, og om mulighederne og begrænsningerne for at påvirke denne, ikke mindst fordi den eksisterende viden viser, at tilgængeligheden varierer meget. Det er også vigtigt at være op-

mærksom på mulighederne for at udmønte den mere præcise viden i den praktiske fodring, idet det sjældent er muligt at fodre dyrene individuelt i forhold til deres fysiologiske behov. I praksis fodres grupper af dyr med den samme foderblanding, og fodringsnormen, der er fysiologisk fastlagt og afhænger af de givne livsytringer, skal omsættes til en fosforkoncentration i foderet.

Reduktion af fosforudskillelsen hos husdyrene uden negative konsekvenser for produktion og sundhed forudsætter imidlertid som tidligere nævnt, at foderets fosforindhold reduceres samtidig med, at fosforudnyttelsen øges. Overordnet set er det enkelt at reducere fosfortildelingen til husdyrene – og dermed fosforudskillelsen – ved at undlade at tilsætte mineralske foderfosfater til foderet, men det forudsætter at udnyttelsen af fosfor i den resterende foderration/foderblanding kan øges tilsvarende. Mulighederne for at reducere fosfortildelingen derudover begrænses af fodermidlernes naturlige fosforindhold og vil være påvirket af udvalget af fodermidler og ofte også af mulighederne for omlægning af sædskifte.

#### *Foderfosfater - mineralsk fosfat*

Foderfosfater af mineralsk oprindelse tilsættes foderet til næsten alle husdyr (ikke mink) for at imødekomme deres fosforbehov, men som nævnt er foderfosfaterne også den del af foderets fosforindhold, som er lettest at fjerne eller ændre på med henblik på en reduceret fosforudskillelse. Det er dog ikke realistisk helt at undlade brug af foderfosfater, idet potentialet for øget udnyttelse af det naturlige fosfor med den nuværende viden ikke altid er stort nok til at dække dyrenes behov ad den vej. Det er imidlertid dokumenteret, at tilgængeligheden af fosfor i foderfosfaterne varierer betydeligt fra omkring 30% til op mod 100%, og derfor er der umiddelbart et væsentligt potentiale i at bruge mindre mængder lettilgængelige foderfosfater, og derved reducere udskillelsen i form af den ufordøjelige rest. Det skal nævnes, at der i 2001 blev indgået en aftale mellem landbruget og Dansk Landbrugs Grovvarereselskab (DLG) og DAKOFO om udfasning af dicalciumfosfat, men denne aftale er i august 2002 afløst af en hensigtserklæring om at bruge lettere fordøjelige fosforforbindelser end det tungt fordøjelige dicalciumfosfat (Sørensen, personlig meddelelse). Dette skulle sikre, at der ikke anvendes foderfosfater med meget lav fordøjelighed. Monocalciumfosfat (MCP) er den mest anvendte type foderfosfat i dansk landbrug.

#### *Fytat – en fosforforbindelse som er vanskelig at omsætte*

Foder til svin og fjerkræ er hovedsageligt baseret på korn, sojaskrå, rapskager o.lign.. Disse råvarer indeholder en stor mængde fosfor, hvoraf størstedelen er bundet i fytat (tabel 2.11). Fytat er den betydeligste oplagringsform for fosfor i kerner og frø. Fytatmolekylet er vist i figur 2.1.

Af tabel 2.11 fremgår, at alle kornarter har et meget højt indhold af fytatbundet fosfor, medens det relative indhold er mindre i produkter af oliefrø. I animalske produkter som fiskemel findes ikke fytatfosfor, medens indholdet i ensilage ikke er undersøgt.

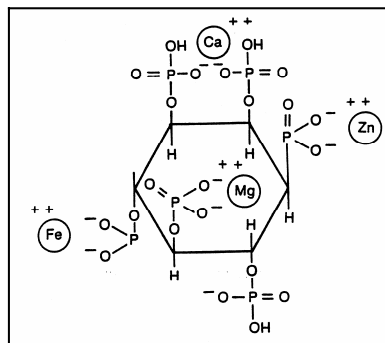
Enmavede dyr (svin, fjerkræ, mink mv.) kan kun i meget ringe grad nedbryde fytatkomplekset i mavetarmkanalen, og derfor er en meget stor del af foderets naturlige fosforindhold utilgængeligt for dyrene. Dette er hovedårsagen til, at foderet ofte tilsættes ekstra fosfor i form af mineralsk foderfosfat, der dog også kan have lav tilgængelighed.



**Tabel 2.11 Fosforoversigt over en række fodermidlers fosforindhold, g/kg tørstof og andelen af fytatbundet fosfor i forhold til totalfosfor, %**

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

Det høje indhold af fytatfosfor i kraftfodermidlerne (f.eks. korn og raps) har indtil nu ikke været anset for et problem hos kvæg i relation til tilgængeligheden af fosfor på grund af aktiviteten af mikrobiel fytase i formaverne, men nye studier indikerer imidlertid, at den totale fordøjelighed af fytatfosfor i kraftfodermidlerne bliver signifikant reduceret ved varme- eller formaldehydbehandling.



**Figur 2.1 Fytatmolekylet (fytat, myo-inositol 1,2,3,4,5,6-hexakisfosfat).**

*Fytase (i plantefrø/-kerner og mikrobielt fremstillet)*

Den lave fosforudnyttelse hos enmavede husdyr skyldes hovedsageligt, at fosfor i de vegetabiliske råvarer i stort omfang er bundet i fytat, som ikke kan nedbrydes og udnyttes. Fytat kan dog nedbrydes enzymatisk af enzymet fytase, hvorved fosfor frigøres til absorption. Fytase findes naturligt i plantefrø og kerner men med varierende aktivitet. Blandt vore kornarter er der ikke påvist fytaseaktivitet i havre, medens enzymet findes med mindst aktivitet i byg, mere i hvede og mest i rug (tabel 2.15). Derfor er fordøjeligheden af fosfor lavere i havre end i f.eks. hvede. En positiv effekt af det naturligt forekommende fytase i foderet forudsætter naturligvis, at enzymet får mulighed for at "arbejde", hvilket bl.a. kræver, at foderet skal være fugtigt og ikke må udsættes for temperaturer over 60° C, hvor enzymet i vid udstrækning denatureres (Jørgensen et al., 1999). Derudover har især temperaturen og tiden, som enzymet får lov at virke, væsentlig betydning for effekten, hvilket bl.a. er vist i *in vitro* studier (Carlson & Poulsen, 2003; Poulsen & Carlson, 2004). I forbindelse med be-

kæmpelsen af *Salmonella*, hvor virksomheder, der er registreret/godkendt som foderstofvirksomheder, skal hindre forekomst af salmonellabakterier, er det blevet almindelig praksis på foderstoffabrikkerne at varmebehandle kornet til mindst 81° C (Bekendtgørelse nr. 672 af 25. august 1997 fra Plantedirektoratet). Dette er i høj grad uheldigt set ud fra et "fosformæssigt synspunkt", idet fytaseenzymet ødelægges under opvarmningsprocessen, hvorved nedbrydningen af fytat mindskes. Dette betyder, at fordøjeligheden af fosfor er en del lavere i fabriksfremstillet end i hjemmefremstillet foder, i særdeleshed i hvedebaserede foderblandinger. I sojaskrå og rapskager vil en evt. fytaseaktivitet allerede blive ødelagt under fremstillingen af selve produktet. Dette betyder, at den efterfølgende opvarmningsproces på foderfabrikkerne – alt andet lige – i givet fald ikke "forårsager yderligere skade" mht. fosfors fordøjelighed i disse produkter. Nye forarbejdningsteknikker ved udvindingen af olie medfører dog muligvis, at der også i oliefrøskrå og -kager kan findes naturlig fytaseaktivitet.

I dag kan man industrielt fremstille en række mikrobielle fytaser med varierende specificitet og temperaturfølsomhed. Enzymet findes i flere former (flydende, pulver, granulat) og kan købes og tilsættes foderet for at forøge fordøjeligheden af fosfor. Der findes flere forskellige produkter af mikrobiel fytase, idet det fremstilles af forskellige producenter. Der er primo 2004 godkendt 4 forskellige produkter, og de kan henføres til 2 typer, nemlig 3-fytaser og 6-fytaser. Denne betegnelse angiver specificiteten over for de 6 fosfatbindinger, der er i fytatmolekylet (figur 2.1). Det kan nævnes, at det naturligt forekommende fytase i plantefrø og -kerner oftest er 6-fytase, medens mikrobiel fytase oftest er 3-fytase (Kempe, 1998).

I tabel 2.12 er givet forskellige karakteristika for de 4 godkendte fytaseprodukter, som er beskrevet i Kommissionens "Fortegnelse over tilsætningsstoffer, der er tilladt i foder offentliggjort i henhold til artikel 9t, litra b), i Rådets direktiv 70/524/EØF om tilsætningsstoffer til foderstoffer" og uddybet af Plantedirektoratet (Litske Petersen, personlig meddelelse). Fytase er godkendt under "Enzymer, E 1600".

**Tabel 2.12 Godkendte fytasetyper og –produkter som tilsætningsstof til foder til husdyr (primo 2004)**

	<b>Tilsætningsstof</b>	<b>Kemisk betegnelse, beskrivelse</b>	<b>Handelsnavn</b>
1.	3-fytase, EC 3.1.3.8	Aspergillus niger	
		CBS 114.94	Natuphos
2.	3-fytase, EC 3.1.3.8	Aspergillus oryzae	Phytase NOVO/ Ronozyme P
		DSM 10289	
3.	3-fytase, EC 3.1.3.8	Trichoderma reesei	Finnase
		CBS 528.94	Biofeed phytase/ Ronozyme P
4.	6-fytase, EC 3.1.3.26	Aspergillus oryzae	
		DSM 11857	

De nævnte produkter er alle godkendte til anvendelse til forskellige husdyr, som angivet i tabel 2.13. Tilladelsen er enten uden tidsbegrænsning eller med tidsbegrænsning (hvilket dog ikke behøver betyde noget ift. praksis (Litske Petersen, personlig meddelelse)).

Det fremgår af tabellen, at de forskellige fytaseprodukter er godkendt til anvendelse til de mest almindelige enmavede husdyr. I Danmark bruges hovedsageligt Natuphos og Biofeed phytase/-Ronozyme P (oplyst af BASF og Roche). I august 2002 blev der som nævnt udsendt en hensigts-erklæring fra DAKOFO, DLG og landbrugets organisationer om at øge anvendelsen af fytase samt lettere fordøjelige foderfosfater (Sørensen, personlig meddelelse).

**Tabel 2.13 Godkendt til dyreart og -kategori (primo 2004)**

		Dyreart og -kategori
1.	Natuphos	Smågrise, slagtesvin, søer, slagtekyllinger, ægl. høner, kalkuner
2.	Phytase NOVO/ Ronozyme P	Smågrise, slagtesvin, slagtekyllinger, ægl. høner
3.	Finnase	Smågrise, slagtesvin, slagtekyllinger
4.	Biofeed phytase/ Ronozyme P	Smågrise, slagtesvin, søer, slagtekyllinger, ægl. høner, kalkuner

Det kan dog synes lidt bagvendt, at man først – af hensyn til sikring af salmonellafri foderstoffer – ødelægger det naturligt forekommende fytase gennem varmebehandling, for dernæst at påsprøjte mikrobielt fremstillet fytase efter varmebehandlingsprocessen, alternativt iblande fytase i foderet inden varmebehandling. Det er specielt uheldigt, når der i blandingerne indgår store mængder hvede, som fra naturens hånd er udstyret med høj fytaseaktivitet og derfor har en højere fordøjelighed af fosfor (se tabel 2.15). Fytase (både det naturligt forekommende og det mikrobielle) vil i høj grad kunne begrænse problemerne med den lave fordøjelighed, hvorved udskillelsen af ufordøjet fosfor med gødningen kan nedbringes.

#### *Sammenfatning af de generelle indsatsområder*

Sammenfattende er der fire muligheder for forbedring af fosforudnyttelsen gennem:

1. Mere præcise fodringsanbefalinger baseret på dyrenes fysiologiske behov
2. Tildeling af fosfor i forhold til det aktuelle behov
3. Valg af råvarer med høj biotilgængelighed af fosfor og evt. lavt indhold af fosfor
4. Stimulering af udnyttelsen af fosfor i foderstoffer (eks. fytase) kombineret med mindsket brug af mineralisk foderfosfat.

I de efterfølgende afsnit vil disse punkter blive gennemgået for de enkelte dyrearter og mulighederne for at mindske udledningen af fosfor med husdyrgødningen blive beskrevet.

#### **2.3.2. Svinets fosforudnyttelse og mulighederne for forbedring**

Svinets udnyttelse af fosfor i foderet ligger på 13-40% (tabel 2.10), og årsagen hertil kan for slagtesvin og smågrise hovedsageligt tilskrives for lav eller manglende kendskab til tilgængelighed af fosfor i foderet (ovennævnte punkt 3 og 4), idet dyrenes fysiologiske behov er ret godt dokumenteret gennem de seneste år (Poulsen, 1994; Nielsen, 1995; Jørgensen et al., 1997). For søer gælder derimod, at der fortsat er usikkerhed om deres fysiologiske behov, selv om der nyligt er gennemført enkelte forsøg (Sørensen & Poulsen, 1997; Sørensen & Poulsen, 2002; Sørensen, 2002). For søerne gælder også, at der er væsentlig usikkerhed om tilgængeligheden af foderstoffernes naturlige fosforindhold.

### *Fosforbehov og praktiske anbefalinger*

Svins fysiologiske behov fastlægges gennem forskning og forsøg. Dette sker oftest gennem dosis-responsforsøg, hvorved det fysiologiske behov fastlægges, og ud fra forskningsresultaterne udmøntes herefter de praktiske fodringsanbefalinger til alle kategorier af svin. Det fysiologiske behov skal tilgodeses behovet til vedligehold, vækst og reproduktion (fostre og mælkeproduktion). Desuden skal de obligatoriske endogene tab (primært gødning og urin) dækkes. Da der under praktiske forhold altid er større usikkerhed, er det nødvendigt, at de forsøgsmæssigt bestemte behov tillægges en vis sikkerhedsmængde for at minimere risikoen for underforsyning. De aktuelle fodringsanbefalinger for fosfor til svin er vist i tabel 2.14.

**Tabel 2.14 Uddrag af de aktuelle fodringsanbefalinger vedr. fosfor til svin (Landsudvalget for Svin, 2002)**

	Smågrise 7-30 kg	Slagtesvin 30-100 kg	Drægtige søer	Diegivende søer
g fordøjeligt fosfor/FEs	3,2	2,2	2,2	2,7
FEs/kg foder (gns.)	1,13	1,06		1,05
g fordøjeligt fosfor/kg foder	2,8	2,1	2,1	2,6

Tabellen viser, at den anbefalede fodringsnorm til svin anføres i fordøjeligt fosfor, og at der anvendes fasefodring, hvorved foderets indhold af fordøjeligt fosfor bedst muligt tilpasses grisenes behov. Det fremgår, at smågrisenes fosforbehov (udtrykt pr. kg foder eller pr. FEs) er størst, og at drægtige søer og slagtesvin har det mindste behov. Det skal nævnes, at der findes fodringsanbefalinger for kortere vægtintervaller for smågrise og slagtesvin, end de i tabellen viste intervaller.

I de praktiske fodringsanbefalinger kan det dog være risikabelt at gå for langt ned i fosforniveau, idet der er en lang række usikkerheder omkring det reelle fosforindhold i foderet. Blandt andet kan der være stor variation i foderstoffernes fosforindhold, usikkerhed omkring fordøjeligheden af fosfor, blandeunøjagtigheder, afblanding af foder, afvigende produktionsforhold m.m. Disse forhold gør, at det som nævnt er nødvendigt med en vis sikkerhedsmargen ved udformningen af fodringsanbefalinger ud fra forskningsresultater. Men i takt med at der opnås viden om svins fosforbehov, om fordøjeligheden af fosfor samt muligheden for at checke den, vil det blive muligt at mindske sikkerhedsmargenen.

### *Fytatbundet fosfor*

Svinefoder er baseret på vegetabiliske foderstoffer, og i Danmark består foderet hovedsageligt af korn, sojaskrå og rapskager. Disse fodermidler indeholder som nævnt en stor andel af fytatbundet fosfor (tabel 2.13), som er vanskeligt at udnytte for svin. Derfor tilsættes foderblandingerne oftest ekstra fosfor i form af mineralsk foderfosfat. Mængden af foderfosfattilskud har dog gennem de seneste år været faldende, hvilket har medført, at udskillelsen af fosfor med gødningen er reduceret (jfr. tabel 2.1). Det skyldes bl.a. ny viden om tilgængeligheden af fosfor i de forskellige mineralske fosfatkilder (Poulsen, 1995), som har medført, at der anvendes mindre mængder med større tilgængelighed. Men også kendskabet til svins (især slagtesvins) fysiologiske fosforbehov er blevet bedre dokumenteret under danske produktionsbetingelser, ligesom der er skabt ny viden om tilgængeligheden af fosfor i foderstofferne. Et væsentligt aspekt er, at det er blevet teknologisk og økonomisk

muligt at tilsætte det fytatnedbrydende enzym fytase til svinefoderet, og derved øge tilgængeligheden af foderets naturlige fosforindhold. Derfor er det blevet muligt at reducere fodringsnormen for totalfosfor, selv om normen for fordøjeligt fosfor er uændret.

#### *Fytase (i plantefrø/-kerner og mikrobielt fremstillet)*

Som nævnt ovenfor er hovedproblemet bag svins lave fosforudnyttelse, at fosfor i de vegetabiliske råvarer i stort omfang er bundet i fytat, som svin ikke kan nedbryde og udnytte. Fytase har dog vist sig at kunne medføre en øget nedbrydning af fytat, hvorved fosfat frigøres til absorption. Forsøg har vist, at jo større det naturlige fytaseindhold er i foderet, desto større er fordøjeligheden af fosfor i foderstofferne. Derfor er fordøjeligheden størst i hvede, rug og tritcale, efterfulgt af byg (tabel 2.15). Ved varmebehandling af kornet nedsættes fordøjeligheden markant (tabel 2.15), idet fytase inaktiveres mere eller mindre under varmebehandlingen. I oliefrøprodukter uden egen fytaseaktivitet er fordøjeligheden væsentlig lavere end i ikke-varmebehandlet korn. Fordøjeligheden af fosfor i fiskemel er derimod høj, idet det ikke indeholder fytat (tabel 2.15).

**Tabel 2.15 Fytaseaktivitet og fordøjelighed af fosfor i en række danske foderstoffer til svin (Poulsen, upubliceret)**

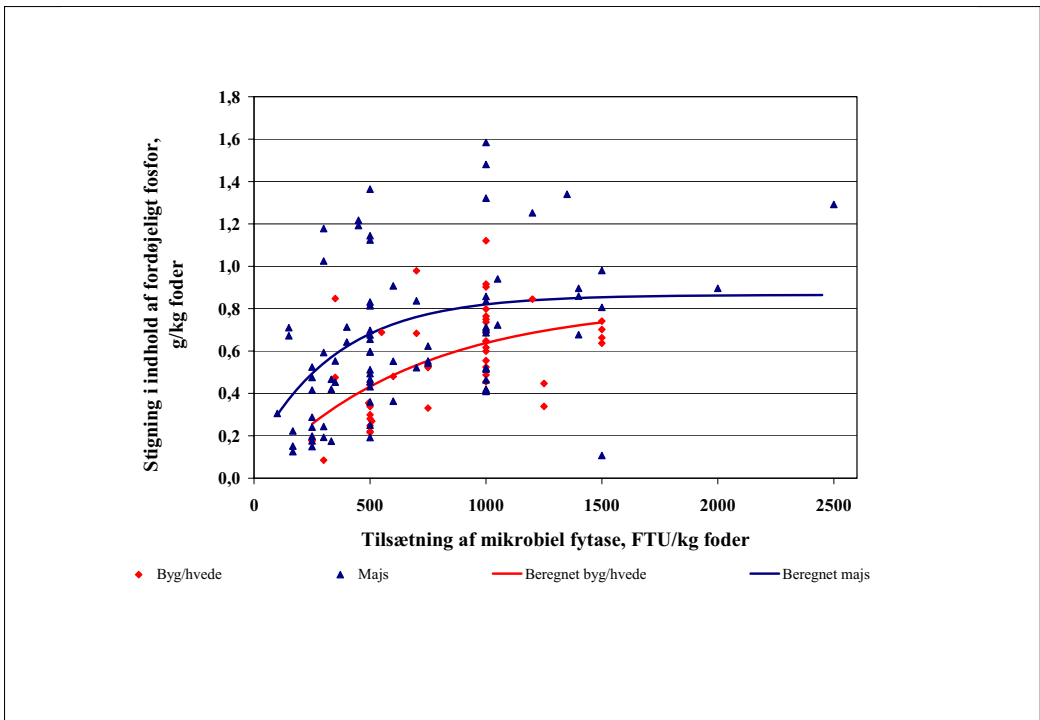
Fodermiddel	Ikke-varmebehandlet		Varmebehandlet	
	Fytaseaktivitet, FTU/kg	Fordøjelighed af fosfor, %	Fytaseaktivitet, FTU/kg	Fordøjelighed af fosfor, %
Byg	720	48	590	44
Hvede	690	57	95	30
Rug	1940	53	1730	51
Triticale	1620	54	210	36
Sojaskrå	-	-	0	45
Rapskager	-	-	0	39
Fiskemel (LT)	-	-	0	70

#### *Effekt af fytasetilsætning til svinefoder under danske forhold*

Effekten af at tilsætte mikrobiel fytase til foderet afhænger i høj grad af, hvor stor aktivitet, der er af det naturligt forekommende fytase i foderstofferne (Poulsen & Johansen, 2004). Der er nogen usikkerhed om størrelsen af effekten af tilsætning af mikrobiel fytase under danske forhold, idet effekten afhænger af foderblandings sammensætning, den naturlige fytaseaktivitet, varmebehandling mv.

Som tidligere nævnt inaktiveres fytase delvist under processing af foderet på foderfabrikkerne, men der vil typisk være omkring 200 FTU pr. kg foder tilbage (FTU= fytaseaktivitets-enhed). Det betyder, at fordøjeligheden af fosfor i varmebehandlet foder forventes at være mindst 40%, hvor den i ikke-varmebehandlet foder ofte ligger på 50-55%, når foderet primært er baseret på korn med høj fytase-aktivitet (eks. hvede og byg). Forsøg viser, at fordøjeligheden af fosfor generelt stiger til omkring 60%, når hvede/bygblandinger tilsættes mikrobiel fytase. Dette betyder, at den forventede effekt ikke er ret stor ved ikke-varmebehandlet foder (svarende til foderfremstilling på bedriften), medens den er væsentligt større ved fabriksfremstillet foder. I figur 2.2 er vist nogle resultater fra

forsøg, hvor fordøjeligheden af fosfor blev bestemt i forskellige foderblandinger (med og uden fytasetilsætning). Foderblandingerne er ikke varmebehandlet ved forarbejdningen.



**Figur 2.2. Stigning i indhold af fordøjeligt fosfor efter tilsætning af mikrobiel fytase til byg/hvede- og majsbaseret ikke-varmebehandlet foder (review: Johansen & Poulsen, 2003a,b).**

Figuren viser resultaterne fra 74 publicerede (udenlandske og danske) forsøg, hvor effekten af tilsætning af mikrobiel fytase blev bestemt. Hvert punkt repræsenterer et forsøgsresultat. Det fremgår, at den målte effekt steg med stigende fytasedosering, og at effekten generelt klinger af, når fytasetilsætningen overstiger 6-800 FTU pr. kg foder. Det fremgår endvidere, at effekten af fytase varierer meget. Forsøgsresultaterne blev opdelt i majs henholdsvis byg/hvede efter foderblandings sammensætning. Det fremgår, at den fundne effekt af fytase afhænger af blandingens type, idet majsblandinger gav et højere respons af fytasetilsætning sammenlignet med byg/hvede. Årsagen hertil er, at den naturlige fytaseaktivitet i majs er meget lille, hvorimod byg/hvedeblandinger har en ikke ubetydelig naturlig fytaseaktivitet. Aktiviteten varierer dog mellem de enkelte forsøg pga. forskellige andele af byg og hvede, men også fordi der har vist sig at være sortsforskelle mht. fytaseindhold inden for korn (Poulsen, upubliceret; Hovenjürgen et al., 2003). Under danske produktionsbetingelser er det kun relevant at medtage resultaterne fra byg/hvedeforsøgene, idet der ikke bruges majsbaseret foder. Ud fra de tilpassede kurver kan det forventes, at tilsætning af mikrobiel fytase (550-700 FTU pr. FE) medfører en stigning i indholdet af fordøjeligt fosfor på ca. 0,3-0,4 g fordøjeligt fosfor

pr. FEs. Den eksakte effekt afhænger dog meget af foderets naturlige fytaseindhold (inden tilsætning af mikrobiel fytase). Alle de publicerede forsøg er baseret på ikke-varmebehandlet foder, og der er ikke publiceret resultater fra forsøg med tilsætning af fytase til varmebehandlet byg/hvedebaseret foder. Danmarks JordbrugsForskning (DJF) har dog et forsøg i gang til belysning af dette. Budskabet er, at der ikke kan regnes med en fast standardeffekt ved tilsætning af fytase, men at effekten afhænger af foderets sammensætning og indhold af naturligt fytase. Desuden er budskabet, at effekter opnået ved forsøg med majsblandinger ikke kan overføres til danske forhold, og at den forventede effekt af fytasetilsætning til ikke-varmebehandlet dansk svinefoder ligger på maksimalt 0,3-0,4 g fordøjeligt fosfor pr. FEs.

Sammenfattende kan tilstedeværelsen af fytase (plante og/eller mikrobiel fytase) sikre, at fordøjeligheden af det naturligt forekommende fosfor i teorien ligger på omkring 60%, hvilket dog betyder, at 40% af foderstoffernes fosforindhold stadigvæk udskilles som en ufordøjet rest med gødningen.

Landsudvalget for Svin har angivet nogle praktiske anbefalinger vedr. brugen af fytase i svinefoder, idet det er antaget, at 50 eller 55% af foderets fosforindhold er fordøjeligt, hvis der tilsættes fytase. Det beregnede minimumsindhold af fosfor i forskellige foderblandinger er angivet i tabel 2.16 ved antagelse af forskellige fosforfordøjeligheder sammen med foderets naturlige fosforindhold.

**Tabel 2.16 Anbefalet minimumsindhold af fosfor efter tilsætning af mikrobiel fytase til varmebehandlet foder**

	Nugældende anbefaling, g fordøjeligt fosfor/FEs <sup>1)</sup>	Vejledende anbefaling, totalfosfor <sup>1)</sup>	Det aktuelle gns. totalfosforindhold <sup>2)</sup>	Beregnet reduktions-potentiale ved fytasetilsætning <sup>3)</sup>	
Fordøjelighed af plante P, %	-		-	55	60
Fosforindhold, g/FEs					
Smågrise	3,2	5,4	5,9	5,2	5,0
Slagtesvin	2,2	4,1	4,9	3,9	3,7
Drægtige/diegivende søer	2,2/2,7	4,1/4,9	5,6	3,9/4,6	3,7/4,4

<sup>1)</sup> Anbefaling fra Landsudvalget for Svin, 2003 (korn/sojaskråbaserede blandinger tilsat monocalciumfosfat og tilpassede mængder fytase).

<sup>2)</sup> Gns. fosforindhold i svinefoder i 2002 (Poulsen et al., 2003a).

<sup>3)</sup> Det antages, at effekten af fytase medfører en fordøjelighed på 55 henholdsvis 60% (60% svarer til den maksimale typiske effekt af fytasetilsætning til byg/hvedeblandinger i forsøg (Johansen & Poulsen, 2003a)).

Hvis foderets fosforindhold nedsættes som angivet i tabel 2.16, vil det betyde en reduktion i foderets indhold på 10-20% ved antagelse af en fosforfordøjelighed på 50%, på 13-24% ved en fordøjelighed på 55% og 18-23% ved en fordøjelighed på 60%, som er det forsøgsmæssigt typiske niveau, der kan opnås med de fytaseprodukter, der er på markedet.

Når foderets fosforindhold reduceres efter tilsætning af mikrobiel fytase, vil indholdet af fosfor i gødningen også blive nedsat. I tabel 2.17 angives det beregnede indhold af fosfor i svinegødning, hvis foderets fosforindhold reduceres som angivet i tabel 2.16. Samtidigt angives den procentuelle reduktion i forhold til indholdet år 2002.

Af tabellen fremgår, at fosforindholdet i gødningen kan reduceres med 15-27% ved antagelse af en fosforfordøjelighed på 50%. Ved antagelse af en fordøjelighed på 55% kan der reduceres med 21-33% og med 25-40% ved en fordøjelighed på 60%. Alle værdier er beregnet i forhold til den aktuelle fosforudskillelse. Desuden vil et krav om en fosforfordøjelighed på 50, 55 og 60% kræve tilstedeværelsen af fytase, naturlig og/eller mikrobiel. På grund af usikkerheder om tilstedeværelsen af tilstrækkeligt naturligt fytase vil det i praksis ofte være nødvendigt at tilsætte fytase men i varierende mængder, der svarer til kravene til fordøjelighed. Det skal nævnes, at en fordøjelighed på godt 60% aktuelt er det maksimale, der kan opnås under forsøgmæssige forhold. På grund af usikkerheder under praktiske forhold vil det på nuværende tidspunkt ikke være muligt at regne med en fordøjelighed efter tilsætning af fytase på over 55% af foderets naturlige fosforindhold. Ved 1,4 DE pr. ha vurderes det, at det gennemsnitlige indhold i svinegødning ved en antaget fordøjelighed på 55% er 31, 29 og 21kg pr. ha for søer, smågrise og slagtesvin.

**Tabel 2.17 Potentiel reduktion i fosforudskillelsen ved anvendelse af fytase (fordøjelighed af fosfor sat til 50 eller 60%) samt den procentuelle reduktion ift. den aktuelle fosforudskillelse. Ved beregningerne er brugt værdierne fra tabel 2.16**

	Fosfor i foder, g/FEs <sup>1)</sup>	Fosfor i gødning, kg	Reduktion ift. 2002, %	Ved 1,4 DE/ha, kg P/ha
1 årsso inkl. grise til fra- vænning (7,2 kg)	5,6 (år 2002)	6,6	-	40
	4,9 (norm)	5,7	15	34
	4,6 (fytase)	5,2	21	31
	4,4 (fytase)	5,0	25	30
1 smågris (7,2-30 kg)	5,9 (år 2002)	0,15	-	37
	5,4 (norm)	0,13	16	32
	5,2 (fytase)	0,12	22	29
	5,0 (fytase)	0,11	28	27
1 slagtesvin (30-100 kg)	4,9 (år 2002)	0,62	-	31
	4,1 (norm)	0,45	27	23
	3,9 (fytase)	0,41	33	21
	3,7 (fytase)	0,37	40	19

<sup>1)</sup> Foderforbrug og aflejring antages at være konstant.

Det naturlige fosforindhold i svinefoder ligger på omkring 3,9 g pr. FEs til søer og slagtesvin og omkring 4,5 g pr. FEs til smågrise. Hvis fodringsnormerne nedsættes som anført i tabel 2.16, vil det ikke være nødvendigt at anvende mineralisk foderfosfat til slagtesvin for at dække behovet. Derimod vil der være et fortsat behov for tilskud til smågrise- og sofoder, selv om dette også er reduceret betydeligt. Spørgsmålet er dog, om drægtige søer har et fysiologisk behov, der er så stort, som der lige nu regnes med. Teoretiske beregninger viser, at drægtige søers behov burde kunne dækkes uden tilskud af mineralisk fosfat især hos ældre søer. Et stort soforsøg har dog vist, at der kan være produktionsmæssige problemer i form af forringet kuld størrelse, især hos de unge søer (Sørensen og Poulsen, 2002). Dette bør afklares yderligere. Et igangværende forsøg forventes at kunne give en indikation om mulighederne for at reducere fosfortildelingen til søer.

Under antagelse af at fosforfordøjeligheden i praksis er 55%, og at slagtesvin ikke behøver tilskud af mineralisk fosfat, kan det på basis af værdierne i tabel 2.16 beregnes, at forbruget af foderfosfat



kan reduceres med omkring 8.000 tons fosfor. Herved kan forbruget i svineproduktionen begrænses fra beregnet 11.500 til 3.500 tons mineralsk foderfosfat, hvilket svarer til en reduktion på 75%. Hvis fordøjeligheden af fosfor kan hæves til 60%, vil reduktionen ligge på ca. 9.000 tons (beregnet).

#### *Foderfosfater*

Biotilgængeligheden af fosfor varierer meget mellem de forskellige foderfosfater. En dansk undersøgelse med svin viser, at fordøjeligheden kan variere mellem 50 og 79% (tabel 2.18).

**Tabel 2.18 Fordøjeligheden af fosfor i foderfosfater bestemt i forsøg med svin (Poulsen, 1995, 1998)**

<b>Foderfosfat</b>	<b>Fordøjelighed, % af P-indhold</b>
Mononatriumfosfat (Bolifor MSP)	79
Monodicalciumfosfat (Modical 18)	72
Monocalciumfosfat (Bolifor MCP 22,7)	68
Monodicalciumfosfat (Bolifor DCPG)	65
Monocalciumfosfat (Mocalphos)	64
Dicalciumfosfat (Dical 18)	59
Dicalciumfosfat (Bolifor DCP)	52
Ca-Na-fosfat (defluoriseret fosfat)	50

Som nævnt er der indgået en hensigtserklæring om at udfase brugen af dicalciumfosfat, hvor fosfat-tilskud er påkrævet. Fordøjeligheden af fosfor i monocalciumfosfat er ud fra ovennævnte forsøg sat til 67% i praksis. Dette tiltag skulle sikre, at der ikke anvendes foderfosfater med meget lav fordøjelighed, og monocalciumfosfat bruges da også som nævnt i vid udstrækning.

#### *Konklusion*

Potentialet for at reducere fosforudskillelsen fra svin ligger primært i at forbedre udnyttelsen af det naturligt forekommende fosfor under samtidig reduktion i tilsætning af foderfosfat. Dette vil kræve udbredt brug af tilsætning af mikrobiel fytase, men den eksakte dosering af mikrobiel fytase afhænger af foderets naturlige fytaseindhold. Denne er almindeligvis høj, når foderet – baseret på korn (byg og hvede) – ikke varmebehandles men kan være væsentligt lavere, når foderet varmebehandles på foderfabrikkerne. Ved den aktuelle svineproduktion er det beregnet, at forbruget af foderfosfat ligger på 11.400 tons, og det vurderes, at forbruget vil kunne reduceres med omkring 8.000 tons fosfor. Herved vil den samlede fosforudskillelse fra svineproduktionen (aktuelt niveau) kunne reduceres med omkring 30%. Fosforbidraget fra svineproduktionen vil derefter ligge på ca. 17.500 tons pr. år. Hvis effekten af fytase kunne øges ud over 55-60%, vil behovet for foderfosfattilsætning blive yderligere reduceret. Dette er dog ikke muligt med de fytaseprodukter, der aktuelt er på markedet. Maksimalt vil der kunne opnås en besparelse på 11.400 tons fosfor pr. år svarende til, at brugen af foderfosfat helt kan undgås, hvilket som nævnt ikke kan opnås pt. Yderligere fodringsbetingede reduktioner i udskillelsen af fosfor vil kræve nedsættelse af fodringsnormerne, men ud fra den eksisterende viden vil det ikke være muligt for smågrise, slagtesvin og diegivende søer, men teoretisk vil der være mulighed for en nedsættelse af fosfornormen til drægtige søer (især ældre søer). Dette skal dog først fastslås gennem forsøg. Det skal også her nævnes, at den almindelige produktivitetsstigning medfører, at foderforbruget pr. produceret slagtesvin fortsat forventes at falde, hvilket også

vil medføre en reduktion i fosforudskillelsen. Hvis det viser sig muligt at ændre brugen af foderfosfat fra monocalciumfosfat til mononatrium med en højere fordøjelighed, vurderes dette at kunne medføre et lille fald på omkring 500 tons foderfosfat. Alle beregninger forudsætter uændret produktion (hverken fald eller stigning i antal producerede slagtesvin).

### 2.3.3 Kvægs fosforudnyttelse og mulighederne for forbedring

Kvægets udnyttelse af foderets fosfor til aflejring i tilvækst og mælk er relativt lav med et gennemsnitligt udnyttelsesniveau i intervallet 20 til 30%. De resterende 70 til 80% udskilles med gødningen (urin plus fæces), svarende til ca. 17 til 25 kg fosfor pr. dyreenhed (DE).

Danske malkekøer udnytter med det nuværende ydelsesniveau (2001/2002) gennemsnitligt ca. 28% af det tildelte fosfor til aflejring i mælk og tilvækst, og udskiller ca. 18 kg fosfor i gødningen pr. DE svarende til 18-21 kg fosfor pr. årsko (tabel 2.19, midterste to kolonner). Tabellen viser yderligere fosforudskillelsens følsomhed for udsving i mælkeydelse og foderets fosforindhold. En ydelsesstigning på 100 kg mælk pr. årsko (stor race) pr. år vil medføre et øget foderforbrug på ca. 44 FE, en øget fosforudskillelse på ca. 107 g (0,5%), og en reduktion i fosforudskillelsen pr. kg mælk på ca. 0,7%. En ydelsesstigning på ca. 100 kg pr. ko pr. år vil således på landsplan medføre en reduktion i fosforudskillelsen på ca. 7 ton forudsat uændret kvote (total produktion) og tilsvarende fald i antal køer. De to sidste søjler i tabel 2.19 viser beregningernes følsomhed over for foderets fosforkoncentration. Hvis indholdet af fosfor i foderet kan reduceres til ca. 3,8 g pr. FE, kan udskillelsen af fosfor reduceres betydeligt (tabel 2.19), og udnyttelsen kan nå ca. 33-35%, hvis ikke produktion og sundhed påvirkes negativt. Men der er ikke tilgængeligt datagrundlag for en revurdering af foderets fosforindhold i praksis i forhold til de 4,6 g fosfor pr. FE, som blev anvendt af Poulsen et al. (2001).

**Tabel 2.19 Malkekøernes fosforudskillelse og –udnyttelse ved varierende ydelsesniveau og fosforindhold i foderet**

	“Ydelse før” <sup>1)</sup>		“Ydelse nu” <sup>2)</sup>		“Red. P i foder” <sup>3)</sup>	
	Tung	Jersey	Tung	Jersey	Tung	Jersey
Ydelse, kg/årsko	7659	5460	8243	5824	8243	5824
Fosfor, g/FE		4,6		4,6		3,8
Fosfor udnyttelse, %	28	27	29	27	35	33
Fosfor i gødn., kg/årsdyr	20,2	17,1	20,8	17,6	15,6	13,3
kg/DE	17,2	17,1	17,7	17,6	13,3	13,3
g/kg produceret mælk	2,6	3,1	2,5	3,0	1,9	2,3

<sup>1)</sup> Som i Poulsen et al. (2001): Ydelse på 1998/1999-niveau, fosforniveau i foder baseret på PFK 1996-1998.

<sup>2)</sup> Ydelse på 2001/2002-niveau (Barret & Stendal, 2003), fosforniveau baseret på PFK 1996-1998 (Kjeldsen & Aaes, 1999).

<sup>3)</sup> Ydelse på 2001/2002-niveau, fosforniveau som anbefalet af Aaes & Sehested (2003).

Tabel 2.20 viser, at kvierne udnytter ca. 23% af det tildelte fosfor og udskiller ca. 17 til 18 kg fosfor pr. DE, mens ungtyrene udnytter ca. 29% af det tildelte fosfor men udskiller ca. 21 til 25 kg fosfor pr. DE.

**Tabel 2.20 Udskillelse og udnyttelse af fosfor hos kvier (opdræt) og ungtyre. Baseret på DJF rapport nr. 36 (Poulsen et al., 2001) samt delvist publicerede opgørelser fra periodefoderkontrol i kvægbesætninger i perioden 1995-1998 (Kjeldsen & Aaes, 1999)**

	Kvier		Ungtyre	
	Tung	Jersey	Tung	Jersey
P, g/FE	4,5		5,2	
Fosforudnyttelse, %	23		29	
Fosfor i gødn., kg/årsdyr el. enhed <sup>1)</sup>	5,9	4,5	7,3	5,5
Fosfor i gødn., kg/DE	17,1	18,0	21,4	24,7

<sup>1)</sup> Opgjort pr. årsdyr for kvier og pr. produceret enhed for ungtyre.

Datagrundlaget for tabellerne 2.19 og 2.20 er foderplaner (FTD) og periodefoderkontroller (PFK) indberettet fra praksis i perioden 1995 til 1998, samt årsopgørelsen fra ydelseskontrollen i kontrolåret 2001/2002 (Kjeldsen & Aaes, 1999; Barret & Stendal, 2003), og beregningsmetoder som anvendt af Poulsen et al. (2001) og angivet i Bekendtgørelse nr. 604 af 15. juli 2002 fra Miljøministeriet, hvad angår DE. På grund af strukturelle ændringer i kvægbruget og rådgivningstjenesten samt implementering af decentrale EDB-løsninger i rådgivningen, er der ikke et nyere repræsentativt datagrundlag vedrørende fodringen i praksis. Den seneste ændring af fodringsnormerne for fosfor blev implementeret i 1995, hvorfor det ikke er relevant at gå længere tilbage.

#### *Forbedringsmuligheder*

En høj fosforudnyttelse er afhængig af :

1. at dyrenes fysiologiske behov er veldefinerede
2. at foderets fosforindhold er veldefineret og har en høj fordøjelighed
3. at fodringsnormerne afspejler behov og fordøjelighed
4. at dyrenes i praksis tildeles fosfor efter deres aktuelle behov.

Mulighederne for en forbedring af fosforudnyttelsen ligger inden for disse fire punkter. Der er grundlag for en nedjustering af fodringsnormerne ud fra den nyeste viden om dyrenes fysiologiske behov for fosfor og fordøjeligheden af fosfor i fodermidlerne, hvilket kan give grundlag for en bedre fosforudnyttelse. Aflejringen af fosfor ved forskellige livsytringer (f.eks. tilvækst og mælkeproduktion) er forholdsvis veldefineret, mens der er nogen usikkerhed om behovet til vedligehold. Den nyeste viden om fysiologisk behov er dog endnu ikke i alle tilfælde indbygget i de danske fodringsnormer. Adgang til foderanalyser for fosfor i praksis giver mulighed for at planlægge tildelingen af fosfor mere præcist, hvorimod manglende viden om fordøjeligheden af foderets fosforindhold betyder, at der fortsat skal være en sikkerhedsmargen i fodringsnormerne og fodringsplanlægningen, som tager hensyn her til. Fodermidlernes naturligt høje indhold af fosfor vil imidlertid i mange tilfælde begrænse muligheden for at nedregulere fosfortildelingen i praksis, som dog aktuelt ligger højere end den anbefalede norm (Strudsholm et al., 1999; Poulsen et al., 2001; Aaes & Sehested, 2003).

#### *Fysiologisk behov til vedligehold*

Vedligeholdelsesbehovet udgør en væsentlig del af koens samlede fosforbehov men er reelt et obligatorisk tab af fosfor med gødningen. Hvis den nuværende viden om det obligatoriske tab er rigtig,

er en udnyttelsesgrad på 40% (gennemsnitligt over en laktation) formentlig det maksimalt opnåelige hos malkekøerne. Det obligatoriske tab af endogent fosfor (E(P)) udgør den altovervejende del af behovet til vedligehold, idet den basale udskillelse af fosfor med urinen (U(P)) er minimal. Den aktuelle danske fodringsnorm for fosfor til vedligehold hos køer er 3 g fosfor pr. 100 kg legemsvægt og forudsætter således, at E(P) er en funktion af dyrets vægt (Strudsholm et al., 1999). AFRC (1991) og NRC (2001) bygger på opdaterede reviews af litteraturen på området og vurderer behovet til vedligehold meget ens og som en funktion af tørstofoptagelsen. AFRC (1991) – de britiske fodringsnormer – konkluderede, at E(P) afhænger af foderet kvalitet q (q=andelen af bruttoenergien som er metaboliserbar) og mængde (kg tørstof), og angiver E(P) som en funktion af foderoptagelsen:

$$E(P), \text{ g/dag} = 1,6 * (-0,06 + 0,693 \text{ DMI}), \text{ når } q < 0,7$$

hvor DMI=daglig tørstofoptagelse (kg). Hvis  $q > 0,7$  (kraftfoder) anvendes 1,0 i stedet for 1,6 (AFRC, 1991). Formlen er bestemt ud fra en ration baseret på kraftfoder, hvorefter faktoren 1,6 er estimeret (med nogen usikkerhed) for grovfoderholdige rationer (AFRC, 1991). Ved et foderniveau på 20 kg ts pr. dag ( $q < 0,7$ ) giver funktionen et E(P) på ca. 22 g pr. dag.

Herudover udskilles den "ufordøjelige" rest af foderets fosforindhold, samt en mindre mængde fosfor i urin (U(P)). AFRC (1991) vælger at ignorere tabet med urin på grund af dets ubetydelige omfang, mens ARC i 1980 angav U(P) til 2 mg pr. kg levende vægt pr. dag. NRC (2001) – USA's fodringsnormer – lægger sig meget tæt op ad denne vurdering og anslår E(P) til 1,0 g pr. kg fodertørstof og U(P) til 2 mg pr. kg legemsvægt svarende til et samlet tab på ca. 21 g fosfor pr. dag ved en tørstofoptagelse på 20 kg.

Den danske fodringsnorm til vedligehold (Strudsholm et al., 1999) svarer cirka til behovet til vedligehold hos AFRC (1991) og NRC (2001) på samme fodringsniveau (dvs. inden for +/- 10%) i intervallet 16 til 18 kg tørstofoptagelse pr. dag. Ved ca. 14 eller 20 kg ts afviger Strudsholm et al. (1999) med ca. 20% i forhold til AFRC (1991) og NRC (2001). Hvis der sammenlignes til den anbefalede fodernorm til vedligehold beregnet efter AFRC (1991) og NRC (2001), ligger den danske norm mellem 30 og 60% lavere, delvist fordi en del af vedligeholdelsesbehovet indgår i normen til mælkeproduktion. Der er således grundlag for en justering af de danske normer for fosfor til vedligehold.

#### *Fysiologisk behov til tilvækst*

Knoglerne indeholder ca. 57 g fosfor pr. kg, mens aflejringen af fosfor i det øvrige "bløde" kropsvæv, som udgør den dominerende del af tilvæksten, er estimeret til 1,2 g pr. kg (AFRC, 1991; NRC, 2001). På den baggrund udviklede AFRC (1991) en dynamisk funktion (som NRC, 2001 tilslutter sig) til beregning af fosforbehov til tilvækst afhængig af tilvækstraten og den forventede udvoksede vægt:

$$P_{\text{tilvækst}} (\text{g/dag}) = (1,2 + (4,635 * MW^{0,22}) * (BW^{-0,22})) * WG,$$

hvor MW=forventet udvokset vægt (kg), BW=aktuel vægt (kg), og WG=tilvækst (kg/dag).

Strudsholm et al. (1999) vurderer i mange tilfælde behovet til tilvækst forskelligt herfra med en betydeligt højere vurdering til de store kvier og en betydeligt mindre vurdering til de små. Omregnet til fodringsnormer ligger de danske anbefalinger ca 11% lavere for kvier på 200 kg og 30% højere for kvier på 400 kg.

#### *Fysiologisk behov til laktation*

Der er generelt udtalt mangel på data vedrørende mælkenes fosforindhold i litteraturen. Tabel 2.21 viser indholdet af fosfor i dansk mælk og varierer i intervallet ca. 0,95 til ca. 1,2 g pr. liter afhængigt af race, fodring og mælkenes indhold af bl.a. fedt og protein (Edelsten, 1988; Hermansen, upubliceret; Mejeriforeningen, upubliceret). Fosforpuljen i mælk fordeler sig med ca. 20% organisk bundet i kasein, ca. 40% som uorganisk fosfor i kaseinmicellerne, ca. 30% som opløst uorganisk fosfor og ca. 10% er associeret til fedtfraktionen (Edelsten, 1988; Rodehutsord et al., 1996). Såvel AFRC (1991) som NRC (2001) – og en række andre lande – har valgt at anvende 0,9 g fosfor pr. kg mælk som grundlag for beregning af fosforbehovet til laktation. Strudsholm et al. (1999) har sat normen til mælkeproduktion til 2,1 g pr. kg EKM (energikorrigeret mælk), som med den anvendte udnyttelseskoefficient på 0,55 betyder, at udgangspunktet er et behov på 1,16 g pr. kg EKM. Heri er dog indregnet en del af vedligeholdelsesbehovet. Poulsen et al. (2001) og Poulsen & Kristensen (1997) anvendte 0,96 og 1,08 g fosfor pr. kg mælk for henholdsvis stor race og Jersey. Det er ikke klart, hvorfor mælkenes indhold af fosfor vurderes lidt lavere i USA og Storbritannien, men medvirkende årsager kan evt. være, at mælkenes fedt- og proteinindhold generelt er lavere end i dansk mælk, men også at der simpelthen er en mangel på data.

**Tabel 2.21 Indholdet af fosfor i mælk**

g fosfor/kg mælk	Race	Økologisk		Konventionelt	
		Gns.	95% konf.	Gns.	95% konf.
Enkeltdyr <sup>1)</sup> 1997/1998	SDM	1,00	0,95 – 1,06	1,04	0,98 – 1,10
	Jersey	1,12	1,02 – 1,22	1,17	1,07 – 1,27
Silotankmælk <sup>2)</sup> 1995/1996	Blandet	–	–	0,98	0,95 – 1,00

<sup>1)</sup> Hermansen (upubliceret).

<sup>2)</sup> Mejeriforeningen (upubliceret).

#### *Fysiologisk behov til fosterproduktion*

Behovet for fosfor til fosterproduktion er kvantitativt negligerbart indtil det sidste trimester, hvor der er et stigende behov frem til kælvning (AFRC, 1991; NRC, 2001). Såvel AFRC som NRC angiver dynamiske eksponentialfunktioner til beregning af fosforbehovet til fosterproduktion. Hos en ko af stor race stiger behovet fra 1,9 g pr. dag ved 190 dage i drægtigheden til 5,4 g pr. dag ved 280

dage i drægtigheden (NRC, 2001). I Danmark er der ikke angivet en norm til drægtige køer, men til højdrægtige kvier angives normen som 10% af behovet til tilvækst og vedligehold.

#### *Indhold og fordøjelighed af fosfor i foder*

Der er stor variation i fosforindholdet både mellem og inden for fodermidlerne, og der er inden for de seneste år blevet mulighed for analyse af fodermidlernes fosforindhold i praksis. Der mangler imidlertid viden om tilgængeligheden af fosfor i fodermidlerne og absorptionseffektiviteten af det tilgængelige fosfor i koens mavetarmkanal.

Der er en betydelig variation i fodermidlernes fosforindhold, især mellem forskellige typer (Møller et al., 2000), men også inden for de enkelte fodermiddeltyper (Kertz, 1998; Bossen et al., 2000). Omkring to trediedele eller mere af fosforindholdet i korn, produkter af oliefrø, og biprodukter af korn er organisk bundet i fytat (tabel 2.11), hvorimod blade og stængler indeholder meget lidt fytatbundet fosfor (Nelson et al., 1976).

Fordøjeligheden af fosfor afhænger af en række faktorer som tilgængeligheden af fosfor fra foderkilderne, opløseligheden af fosfor i tarmlumen samt af absorptionseffektiviteten. Da absorptionen er under regulering i det enkelte dyr, kan der ikke fastlægges en entydig fordøjelighed i klassisk forstand. Derfor anvendes begrebet tilgængelighed om den del af foderets fosfor, som potentielt vil kunne absorberes. Tilgængeligheden af fosfor i foder af vegetabilsk oprindelse vil afhænge af fordøjeligheden af den organiske matrix, som fosforforbindelserne indgår i samt af tilstedeværelsen af enzymet fytase. Studier ved hjælp af nylonposemetoden indikerer en signifikant variation i fosfortilgængeligheden i mineralske fosforkilder og grovfodermidler (Sehested & Weisbjerg, 2001). Det høje indhold af fytatfosfor i kraftfodermidlerne (f.eks. korn og raps) har indtil nu ikke været anset for et problem hos kvæg i relation til tilgængeligheden af fosfor på grund af aktiviteten af mikrobiel fytase i formaverne (Morse et al., 1992). Nye studier indikerer imidlertid, at den totale fordøjelighed af fytatfosfor i kraftfodermidlerne bliver signifikant reduceret ved varme- eller formaldehydbehandling (Bravo et al., 2000; Park et al., 2000; Sehested & Weisbjerg, 2001).

Projektet "Fosfor i foder, gødning og jord" blev iværksat ved DJF i 1998 i forbindelse med forskningsprogrammet "Bæredygtig håndtering og udnyttelse af husdyrgødning". Som en del af projektet er der gennemført et pilotforsøg vedrørende tilgængeligheden af fosfor i fodermidler og uorganiske foderfosfater til kvæg. Forsøget blev gennemført på fistulerede køer ved hjælp af nylonposemetoden. Resultaterne viste, at tilgængeligheden af fosfor fra almindelige fodermidler i vommen hos køer varierede mellem 69 og 97%. Den totale tilgængelighed af fosfor i vom og tarm blev vurderet på baggrund af fosforkilder, som var forinkuberet i vom og pepsinsaltsyre. Her varierede tilgængeligheden mellem 29 og 100% for de mineralske fosforkilder og mellem 88 og 99% for de organiske fosforkilder (Sehested & Weisbjerg, 2001). Det er tidligere set, at tilgængeligheden af fosfor i uorganiske foderfosfater kan variere betydeligt afhængig af kationen og den matrix, som fosfor indgår i (Witt & Owens, 1983). Bravo et al. (2000) har også anvendt nylonposemetoden til at måle tilgængeligheden af fosfor fra en række kraftfodermidler i formaverne hos køer. Bravo et al. (2000) fandt, at tilgængeligheden varierede mellem 64 og 89% for almindelige kraftfodermidler og mellem 33 og 77% for formaldehydbehandlede kraftfodermidler. Der er et væsentligt potentiale for en øget fos-

forudnyttelse i at bestemme fordøjeligheden af fosfor i foderet, og derigennem at få mulighed for at angive normen som tilgængeligt fosfor og vælge fodermidler med høj tilgængelighed.

#### *Fra fysiologisk behov til fodringsnorm*

En såkaldt faktoriel fodringsnorm fremkommer ved at summere behovet for absorberet fosfor til vedligehold, vækst, laktation og drægtighed og dividere denne sum med udnyttelseskoefficienten(erne) for fosfor i foderet. Udnyttelseskoefficienten er et produkt af tilgængelighed og absorptionseffektivitet, men indeholder i mange tilfælde også en yderligere sikkerhedsmargen for de usikkerheder, der måtte være. Det kan f.eks. være i fastlæggelsen af tilgængelighed og absorptionseffektivitet men også i variation i fodermidlernes fosforindhold og i validiteten af det beregnede fosforbehov. Disse usikkerheder medfører, at udnyttelseskoefficienterne generelt har været lave, samt at normerne generelt har været relativt høje i forhold til koens fysiologiske behov.

En norm kan også fastlægges gennem dosisresponsforsøg, hvor man ud fra dyrenes respons på et interval af fosfor i foderet fastlægger den mængde, som kan anses for tilstrækkelig til at opnå et ønsket respons og undgå negativ påvirkning af produktion og sundhed. En række forsøg viser, at symptomer på fosformangel optræder ved omkring 3 g fosfor pr. kg fodertørstof (NRC, 2001). Langt de fleste foderrationer til malkekøer vil have et naturligt fosforindhold over dette niveau. I et hollandsk forsøg med højtydende malkekøer (9.000 kg mælk pr. laktation) over 2 laktationer (Valk & Sebek, 1999) blev der givet henholdsvis 3,3, 2,8 og 2,4 g fosfor pr. kg fodertørstof, hvor de to højeste niveauer blev opnået ved at supplere med en meget lettilgængelig fosforkilde (mononatriumfosfat). Reproduktionen blev ikke påvirket af behandlingerne, men 2,4 g fosfor medførte reduceret tørstofoptagelse, mælkeydelse og kropsvægt. Wu & Satter (2000a,b) og Wu et al. (2001) gennemførte et forsøg over tre år med et ydelsesniveau på omkring 11.000 kg mælk, hvor der blev givet mellem 3,1 og 4,9 g fosfor pr. kg fodertørstof, og hvor de høje niveauer blev opnået ved at supplere med en meget lettilgængelig fosforkilde (mononatriumfosfat). Den generelle konklusion var, at køerne, der fik 3,1% fosfor var på grænsen til at være i fosformangel, idet de i det ene år havde signifikant reduceret ydelse i sidste trediedel af laktationen, og idet kørerne havde tendens til et lavere fosforindhold i knoglerne. Der blev ikke observeret nogen effekt af fosfortildeling på reproduktionen.

Såvel de danske normer, som AFRC (1991) og NRC (2001) er faktorielle. Baggrunden for de nuværende danske normer er et arbejde af en NJF-arbejdsgruppe, der i 1975 kom med et forslag til fælles nordiske normer for makro- og mikromineraler (Pehrson et al., 1975) på baggrunden af ARC (1965) og NRC (1971). De aktuelle danske fodringsnormer er publiceret af Strudsholm et al. (1999), dog med en nylig korrektion og reduktion af normen til malkekøer (Aaes & Sehested, 2003).

De eksisterende danske normer (Strudsholm et al. 1999; Aaes & Sehested, 2003) er ligesom AFRC (1991) baseret på totalfosfor i foderet. Der tages således ikke hensyn til fodermidlernes forskellige fosfortilgængelighed, idet der er en udtalt mangel på sådanne data (AFRC, 1991). AFRC (1991) anvender to generelle udnyttelseskoefficienter (produkt af tilgængelighed og absorptionseffektivitet) afhængig af foderets kvalitet udtrykt ved  $q$  ( $q$ =andelen af bruttoenergien, som er metaboliserbar). Når  $q > 0,7$  (f.eks. korn), hvilket vil være meget sjældent i foderrationer til malkekøer, anvendes en

udnyttelseskoefficient på 0,70. Når  $q < 0,7$  anvendes en udnyttelseskoefficient på 0,58. NRC (2001) angiver også behovet for absorberbart fosfor og anvender to udnyttelseskoefficienter på 0,64 og 0,70 for henholdsvis grovfoder og kraftfoder. Holland og Frankrig anvender begge 0,60, mens Tyskland anvender 0,70 (NRC, 2001). I Danmark er der hidtil anvendt en udnyttelseskoefficient på 0,55 på grundlag af ARC (1965). Størrelsen af denne faktor har stor betydning for normen. De danske fodringsnormer for fosfor til malkekøer er relativt høje i forhold til køernes behov, men den nyere viden viser, at fosfornormen generelt kan reduceres, når der ikke anvendes fodermidler og mineraler med lav fordøjelighed af fosfor. Der eksisterer dog fortsat usikkerheder omkring behovet til vedligehold og tilgængeligheden af fosfor i fodermidlerne, samt absorptionseffektiviteten af det tilgængelige fosfor i koens mavetarmkanal, som bør indbygges i normerne som en sikkerhedsmargen. Arbejdet med revurdering af de danske fosfornormer er iværksat og planlægges gennemført i et nordisk samarbejde med fælles nordiske normer for øje. Dansk Kvæg har dog i samarbejde med DJF midlertidigt anbefalet en ny reduceret norm for fosfor til malkekøer på grund af et stort behov for anvisninger fra praksis. Den reducerede norm er 3,8 g fosfor pr. FE, hvilket gennemsnitligt svarer til ca. 3,5 g pr. kg fodertørstof (Aaes & Sehested, 2003).

#### *Praktisk anvendelse af fodringsnormerne*

I praksis er det sjældent muligt at fodre dyrene individuelt i henhold til den faktorielle norm. I praksis fodres grupper af dyr sammen, og den praktiske anvendelse af normerne i de fleste fodringsplanlægningsværktøjer er et koncentrationsinterval i foderet afhængig af dyregruppe. Afhængigt af hvor uhomogene grupperne er, kan dette medføre større eller mindre afvigelser for det enkelte dyr og dermed en reduceret fosforudnyttelse. Desuden må der forventes et spild af fosfor med foder, som ikke ædes af dyrene. Der er ikke grundlag for at kvantificere fosfortabet med spildfoder, idet mængden af spildfoder vil variere betydeligt mellem bedrifter og afhængigt af produktionssystemet. Mængden af spildfoder kan forventes at være størst hos malkekøerne, som oftest fodres efter ædelyst. Til gengæld anvendes spildfoder fra malkekøerne ofte som foder til andre dyregrupper.

Ved omregning til fosforkoncentration i foderet på sammenlignelige niveauer af mælkeproduktion (25-30 kg EKM) og tørstofoptagelse (ca. 20 kg) ligger USA's, Storbritanniens og Hollands fosfornormer på henholdsvis ca. 3,4 (USA), 4,3 (GB) og 3,6 (NL) g fosfor pr. kg ts (NRC, 2001; AFRC, 1991; Valk & Sebek, 1999). De nuværende danske fosfornormer er i praksis (Bedriftsløsningen) ca. 4,2 til 4,5 g fosfor pr. FE, hvilket svarer til ca. 3,7-4,5 g pr. kg ts. I Bedriftsløsningens foderplanlægningsprogram er normerne af praktiske grunde ansat pr. FE ud fra det gennemsnitlige behov i strategiperioden (de første 24 uger efter kælvning). Den praktiske anvendelse af normerne er således tilrettelagt efter et relativt højt behov, idet mælkeproduktionen udgør hovedparten af behovet.

En gennemsnitlig dansk foderration vil i praksis ofte ligge over 3,5 g pr. kg ts. Det skyldes, at fosforindholdet i græs og kløvergræs ligger tæt på eller over normen, samt at de proteinrige tilskudsfordermidler har et meget højt fosforindhold. Korn (undtagen havre) og helsædsensilage (inkl. majsensilage) har derimod et generelt lavere fosforindhold, hvorfor disse kan anvendes til at skabe balance i rationen.



Et teoretisk regneeksempel viser, at med udgangspunkt i den anvendte fosfornorm i Danmark (ca. 4,3 g fosfor pr. FE) tildeles en malkeko (årsko) ca. 26 kg fosfor, under antagelse af, at den producerer ca. 7.500 kg mælk på basis af ca. 6.000 FE. Det obligatoriske fosfortab med fæces og urin er på ca. 7 kg fosfor, og behovet til tilvækst plus fosterproduktion kan ansættes til ca. 0,5 kg fosfor og behovet til laktation til 6,8 kg fosfor. Det vil sige, at det ikke er realistisk at nå over 28% udnyttelse (pr. årsko) af det tildelte fosfor under den gældende anvendelse af normen, som dog er under reduktion. I tilfælde af en fodring med mere fosfor end normerne foreskriver, vil udnyttelsen være ringere. Hvis Bedriftsløsningens norm kan reduceres til ca. 3,8 g fosfor pr. FE, vil udnyttelsen øges til ca. 33-35%, og udskillelsen pr. årsko reduceres til ca. 16 kg. Dette vil kræve, at udnyttelseskoefficienten for den samlede foderration er i størrelsesordenen 0,68. I denne situation vil der kun i begrænset omfang være brug for anvendelse af mineralske foderfosfater til kvæg, og det kan beregnes, at forbruget af foderfosfat teoretisk set kan reduceres betydeligt med i størrelsesordenen 2.500 til 3.500 tons fosfor, hvilket svarer til en reduktion i intervallet 55 til 75%.

En væsentlig diskussion er, om fosforbehovet og -tildelingen kan anskues over en reproduktionscyklus som helhed (pr. årsko). Det vil sige, om koen kan mobilisere fosfor fra kropspuljerne (knogler) i nogle perioder og oplagre fosfor i andre uden, at det påvirker livsyttringerne i væsentlig grad. De hidtidige forsøg på dette område viser, at dette kun i begrænset omfang er muligt, idet mobilisering og deponering af knoglepuljen styres af calciumhomeostasen (NRC, 2001). Anvendelse af denne model vil i givet fald kræve, at calcium og fosfor anskues som en enhed i fodringen.

### *Konklusion*

Med den foreliggende viden er der basis for en revurdering og formentlig en mindre reduktion af de danske fosfornormer til kvæg både i anbefalinger og praktisk brug, hvilket er påbegyndt. Fodringsnormernes størrelse kan formentlig reduceres ved at øge udnyttelseskoefficienten fra de hidtidige 0,55 til et niveau på omkring 0,68, som er på linie med AFRC (1991) og NRC (2001). Der er endnu ikke basis for anvendelse af en specifik udnyttelseskoefficient for det enkelte fodermiddel, men de foreliggende data tyder på, at koefficienten i mange tilfælde vil være højere end 0,55, men måske også lavere i enkelte tilfælde (Bravo et al., 2000; Park et al., 2000; Sehested & Weisbjerg, 2001). Den praktiske brug af normer i foderplanlægningen og i udfodringen bør sikre, at fosfor tildeles i forhold til det faktiske behov, samt at der ikke sker en væsentlig overforsyning af grupper af køer. Der er et beregnet potentiale for en reduktion i anvendelsen af mineralsk foderfosfat til kvæg i størrelsesordenen 2.500 til 3.500 ton fosfor, hvilket vil afspejles i udskillelsen af fosfor med gødningen, såfremt kvægets fosforudnyttelse stiger tilsvarende. En reduceret anvendelse af foderfosfater i størrelsesordenen 3.000 ton svarer ca. til en gennemsnitlig reduceret udskillelse i størrelsesordenen 2,5 kg fosfor pr. DE. En stigning i mælkeproduktionen pr. årsko på 100 kg vil medføre en øget fosforudskillelse på ca. 0,5%, og en reduktion i udskillelsen pr. kg mælk på ca. 0,7% ved uændret fosfor-koncentration i foderet (4,6 g pr. FE). På landsplan betyder det en reduktion i fosforudskillelsen på godt 100 tons forudsat uændret kvote (total produktion) og tilsvarende fald i antal køer. Hvis indholdet af fosfor i foderet derimod kan reduceres til ca. 3,8 g pr. FE, kan også udskillelsen af fosfor pr. årsko og DE reduceres betydeligt, og udnyttelsen kan nå ca. 33-35%, hvis ikke produktion og sundhed påvirkes negativt.

De danske normers relativt høje niveau skyldes dels nogle praktiske hensyn og dels den sikkerhedsmargen, der er indbygget i udnyttelseskoefficienten. Sikkerhedsmargenen tager hensyn til den manglende viden om en række faktorer, hvoraf de væsentligste er tilgængeligheden (fordøjeligheden) af foderets fosfor, absorptionseffektiviteten og størrelsen af det endogene og renale tab af fosfor (E(P) og U(P)) under varierende fodringsforhold. AFRC (1991) fremhæver specielt disse faktorer som påtrængende forskningssemner.

#### **2.3.4 Fjerkræs fosforudnyttelse og mulighederne for forbedring**

Slagtekyllingers beregnede fosforudnyttelse ligger på 57% og 22% for konsumægshøner (jfr. tabel 2.10). Derfor er det procentvise potentiale for at reducere udskillelsen af fosfor umiddelbart størst hos konsumægshøner. Årsagen til den lave fosforudnyttelse især hos konsumægshønerne skyldes to forhold, nemlig at fordøjeligheden af fosfor i foderet er lavt, og nok især at dyrene overforsynes med fosfor for at kompensere for manglende viden om det fysiologiske behov samt for manglende kendskab til den præcise fordøjelighed af fosfor i foderet. Som følge af disse forhold har det i mange år været normal praksis at supplere foderet med et stort tilskud af uorganisk fosfor for at sikre, at dyrenes behov blev dækket.

Fosfor i foder til fjerkræ består af naturligt forekommende fosfor fra plantefrø og kerner samt uorganisk fosfor i form af foderfosfat. For det naturligt forekommende fosfor skelnes der mellem, om fosforet er organisk bundet i fytat (fytatfosfor) eller er til stede i andre former (ikke-fytatfosfor). Det fytatbundne fosfor er som nævnt vanskeligt at fordøje for fjerkræ, hvilket er årsag til den lave fordøjelighed af det naturligt forekommende fosfor. Derfor har den generelle opfattelse gennem mange år været, at fytatfosfor var fuldstændigt ufordøjeligt for fjerkræ, mens den resterende del af det naturligt forekommende fosfor og det uorganiske foderfosfat var fuldstændig fordøjeligt (Pedersen, 1990; Van der Klis & Versteegh, 1999; Waldroup, 1999). Nyere forsøg demonstrerer dog, at ingen af disse antagelser er korrekte, idet fjerkræ er i stand til at fordøje en del af det fytatbundne fosfor, såfremt enzymet fytase (naturligt/mikrobielt) er til stede, mens fordøjeligheden af uorganiske foderfosfater er mindre end 100% (Van der Klis & Versteegh, 1999).

#### *Fosforbehov og fodringsanbefalinger*

Fjerkræs fosforbehov er fastlagt gennem forskning og forsøg, og ud fra disse resultater er der udarbejdet fodringsanbefalinger til de forskellige fjerkrækategorier. Disse anbefalinger er angivet i totalfosfor med angivelse af beregnet mængde ikke-fytatfosfor. Ligesom hos svin stimulerer fytase dog nedbrydningen af fytat, og fordøjeligheden øges. Der tilsættes imidlertid stadig foderfosfat til fjerkræfoder. De gældende fodringsanbefalinger og det aktuelle gennemsnitlige indhold af fosfor i foder til slagtekyllinger og æglæggende høner er vist i tabel 2.22.

Det fremgår, at det aktuelle fosforindhold er lidt højere i praksis, end der foreskrives i anbefalingerne. Dette gælder især for høner.

**Tabel 2.22 Fodringsanbefalinger og det aktuelle gennemsnitlige fosforindhold i foder til slagtekyllinger og æglæggende høner**

	Slagtekyllinger (40 dage)	Æglæggende høner (bur)	Æglæggende hø- ner (fritgående)
Fodringsanbefalinger, g fosfor/kg	6,3 <sup>1)</sup>	5,1	5,1
Aktuelt fosforindhold i foder, g/kg	6,6	6,8	6,8

<sup>1)</sup> Heri er indregnet, at der iblandes omkring 20% hel hvede.

#### *Konsumægshøner*

Ifølge NRC (1994) har hvide og brune æglæggende høner med et foderindtag på hhv. 100 og 110 g pr. høne pr. dag et behov på hhv. 0,25 og 0,275% ikke-fytatfosfor. Det angivne foderindtag svarer til forbruget hos burhøner under danske forhold, medens det er 110-120 for gulvhøner og 125 g pr. høne pr. dag for økologiske høner. Forsøg indikerer imidlertid, at indholdet af ikke-fytatfosfor kan reduceres til 0,15-0,22% i majs- og hvedebaseret foder uden at påvirke ægproduktionen. Endvidere tyder forsøgene på, at tildelingen af ikke-fytatfosfor formentlig kan reduceres yderligere til 0,08-0,14% i ikke-varmebehandlet hvedebaseret foder og ligeledes i majsbaseret foder, hvis det suppleres med fytase. Hvis det antages, at foderets fosforindhold kan reduceres til dette niveau, vil fosforudnyttelsen øges til ca. 28%, og fosforudskillelsen vil reduceres med ca. 50%. Forsøgs materialet for hvedebaseret foder er dog meget begrænset. Men forsøgene indikerer, at anbefalingerne ifølge NRC (1994) er for høje. Anbefalingerne bør derfor nedjusteres til hønernes behov og i forhold til, om der suppleres med fytase eller ej (Johansen & Poulsen, 2004). Ved tilsætning af fytase er det dog vigtigt at tage hensyn til foderets sammensætning og især foderets naturlige fytaseaktivitet. Tilsætning af fytase i et forsøg med ikke-varmebehandlet hvede-sojaskrå foder med lavt indhold af ikke-fytatfosfor havde således kun begrænset effekt i forhold til, hvad der blev observeret i et majs-sojaskrå foder. Det skyldes, at hvedens naturlige fytaseaktivitet var i stand til at kompensere for det lave indhold af ikke-fytatfosfor. I Danmark anvendes der store mængder hvede i foder til æglæggende høner. En stor del af dette foder varmebehandles imidlertid på foderstoffabrikken ved minimum 81°C for at mindske risikoen for *Salmonella* (Bekendtgørelse nr. 672 af 25. august 1997 fra Plantedirektoratet). Denne varmebehandling resulterer som nævnt i inaktivering af kornets fytaseaktivitet, hvorfor tilsætningen af fytase til varmebehandlet foder forventes at have større effekt end i ikke-varmebehandlet hvede. Kun få forsøg er imidlertid gennemført for at teste effekten af fytase i ikke-varmebehandlet hvedebaseret foder (Scott et al., 1999; Jamroz et al., 2003), og ingen er tilsyneladende gennemført med varmebehandlet hvedebaseret foder. Derfor er det vanskeligt at anslå, hvor stort potentialet er for at reducere udskillelsen af fosfor under danske forhold ved anvendelse af fytase.

Hos æglæggende høner er skalkvaliteten en meget væsentlig faktor, og der bruges store mængder calcium til dannelsen af æggeskal. Det kræver, at foderet indeholder meget calcium. Der har gennem mange år været tradition for et ret snævert forhold mellem fosfor og calcium i foderet til husdyr. Dette kan være årsag til, at foderet til æglæggende høner i praksis indeholder noget mere fosfor, end normen foreskriver. Det skal nævnes, at betydningen af calcium:fosforforholdet har ændret sig over de senere år hos svin (Poulsen, 1993). Der er derfor grund til at se nærmere på dette aspekt også hos æglæggende høner.

Det skal bemærkes, at fosforudskillelsen i produktionssystemer med fritgående høner er højere end i systemer med burhøner (se tabel 2.6). Der kan således potentielt være konflikt mellem hensynet til dyrevelfærden og hensynet til miljøet. En stigende andel af de ægproducerende høner er fritgående.

### *Slagtekyllinger - behov*

Forsøg med slagtekyllinger viser, at fosforudnyttelsen varierer mellem godt 30 og op til godt 70%. Både ved tilsætning af forskellige mængder fytase, men også inden for samme tilsatte mængde fytase er der stor variation. Ligeledes varierer selve effekten af fytase betydeligt. Det skyldes, at effekten af fytase bl.a. afhænger af fosforindtaget, som ofte er meget forskelligt pga. forskellig foderoptagelse og især pga. blandingerne meget forskellige indhold af fosfor. Der er en generel tendens til, at jo mere uorganisk foderfosfat et foder er tilsat, desto mindre er effekten af fytase på fosforudnyttelsen. Effekten per tilsat fytase-enhed aftager i takt med, at tilsætningen af den totale mængde fytase stiger. Det betyder, at der ofte ikke opnås yderligere effekt ved tilsætning af mere end 500 FTU pr. kg. Dette skyldes dog formentlig, at fosforindholdet i grundfoderet allerede inden tilsætning af fytase ud over 500 FTU pr. kg har dækket slagtekyllingernes behov, således at effekten af fytase er blevet "skjult". Der synes således at være et "loft" for fosforudnyttelsen på 60-70% for majsbaseret foder ved tilsætning af de fytasetyper, der fremstilles i dag. Hvor "loftet" ligger for hvedebaseret foder er vanskeligt at bedømme ud fra de få forsøg, der hidtil er gennemført med hvede (Johansen & Poulsen, 2004). Det vurderes dog, at "loftet" for hvedebaseret foder vil ligge på niveau med majsbaseret foder, da det hos svin ses, at den maksimale fordøjelighed af fosfor efter tilsætning af fytase ligger på 65-70% for både hvede/byg- og majsbaseret foder (Johansen & Poulsen, 2003).

Ifølge NRC (1994) anbefales det at tildele slagtekyllinger fra 0 til 3 uger, 3 til 6 uger og 6 til 8 uger hhv. 0,45, 0,35 og 0,30% ikke-fytatfosfor i foderet. Forsøg med slagtekyllinger indikerer imidlertid, at såfremt foderet suppleres med fytase, kan indholdet af ikke-fytatfosfor i majsbaseret foder formentlig reduceres til 0,34-0,43% i alderen 0-21 dage, og til 0,25-0,30% i alderen 22-42 dage uden at forringe tilvæksten. Reduceres indholdet af ikke-fytatfosfor yderligere til 0,15-0,33% i alderen 0-21 dage og til 0,11-0,23% i alderen 22-42 dage i både majs- og hvedebaseret foder, forringes tilvæksten konsekvent. Suppleres hvedebaseret foder med fytase, opvejes denne forringede tilvækst tilsyneladende, men forsøgsmaterialet er meget spinkelt, hvor der ved tilsætning af fytase til majsbaseret foder stadig er en vis risiko for forringet tilvækst. Det betyder, at anbefalingerne fra NRC er højere end kyllingernes behov og kan nedjusteres alt efter, om der suppleres med fytase, og om foderet er baseret på majs eller hvede. Dette bør dog undersøges i forsøg gennemført under danske produktionsforhold (Johansen & Poulsen, 2004).

I Danmark anvendes hovedsageligt hvede (både ikke-varmebehandlet og varmebehandlet) til slagtekyllinger, og foder til slagtekyllinger (konventionel, 40 dage) indeholder gennemsnitligt 6,6 g totalfosfor pr. kg foder. Antages det, at det er muligt at reducere det totale indhold af fosfor, når der suppleres med fytase, til 5,1 g totalfosfor pr. kg (0-21 dage) og 4,9 g totalfosfor/kg (22-42 dage), som i de hvedebaserede blandinger med et ikke-fytatfosforindhold på 0,15-0,33% (0-21 dage) og 0,11-0,23% (22-42 dage), vil det bevirke, at udnyttelsen af fosfor vil stige, og udskillelsen vil blive reduceret med omkring 55%. Der savnes dog forskningsmæssigt belæg herfor, og det skal under-

streges, at der i de 5,1 g totalfosfor pr. kg (0-21 dage) og 4,9 g totalfosfor pr. kg (22-42 dage) (15-0,33% (0-21 dage) og 0,11-0,23% (22-42 dage)) ikke er inkluderet en sikkerhedsmargin.

### *Konklusion*

Der mangler viden om mulighederne for at reducere fosfortildelingen og -udskillelsen fra fjerkræ under danske forhold. Der er derfor behov for at fokusere på: 1) at klarlægge dyrenes fysiologiske behov for fosfor, så mere præcise normer kan fastlægges uden store sikkerhedsmargener; 2) at foderets fosforindhold optimeres i henhold til, hvad der reelt er fordøjeligt og ikke som nu i henhold til mængden af ikke-fytatfosfor; 3) at klarlægge fordøjeligheden af fosfor i ikke-varmebehandlede/varmebehandlede vegetabiliske foderstoffer; 4) at forbedre fordøjeligheden af fosfor i vegetabiliske foderstoffer ved hjælp af naturlig og/eller mikrobiel fytase og dermed begrænse behovet for at supplere med foderfosfat; 5) at anvende foderfosfater med høj fosforfordøjelighed. Der er indikationer for, at der kan være muligheder inden for alle 5 punkter. Det skal understreges, at det er særdeles vigtigt at inddrage samspillet mellem fosfor og calcium samt vitamin D i dette arbejde. Det vides endnu ikke, hvor stor en andel af den mængde foderfosfat, der bruges til fjerkræ (beregnet til omkring 1.900 tons fosfor), som kan undværes. Men et forsigtigt skøn vil være ca. 800 ton baseret på de nævnte muligheder for at reducere fosfornormerne og fosfortildelingen til fjerkræ. Den aktuelle samlede årlige fosforudskillelse fra fjerkræ er beregnet til knap 3.000 tons.

### **2.3.5 Pelsdyrs fosforudnyttelse og mulighederne for forbedring**

Minks beregnede fosforudnyttelse ligger på 5% (opgjort pr. årstæve), hvilket er meget lavt i forhold til andre dyregrupper (jfr. tabel 2.10). Årsagen til den lave fosforudnyttelse er, at det eneste fysiologiske behov, der skal dækkes, er til aflejring i slagtekrop, skind og hår, hvilket udgør 48 g pr. årstæve.

### *Fosforbehov og fodringsanbefalinger*

Minks fosforbehov er opgjort til ca. 0,4% af tørstofindholdet i foderet, men foderets fosforindhold er ca. 1,4% af tørstof (Tauson et al., 1992). Råvarer anvendt til pelsdyrfoder omfatter i betydelig grad affaldsprodukter som fiske- og fjerkræaffald, der begge har et stort indhold af knogledele og dermed aske (Poulsen et al., 2001). Dette medfører et højt naturligt indhold af fosfor, og der suppleres ikke med mineralsk foderfosfat.

### *Potentiale*

Da al fosfor i pelsdyrfoder stammer fra råvarerne, og der ikke tilsættes foderfosfat, er det kun muligt at reducere udskillelsen af fosfor gennem valg af råvarer med et lavere fosforindhold. Da der bruges store mængder affaldsprodukter med et naturligt højt fosforindhold, er der ikke umiddelbart et potentiale for at reducere fosforudskillelsen fra mink.

Hvis fosforindholdet i pelsdyrfoder skal reduceres, kræver det, at der skiftes til et foder med lavere fosforindhold. Derved vil fiske- og fjerkræaffald ikke direkte kunne anvendes, men det vil fordrø en forarbejdning med henblik på at fjerne knoglerester. Norske undersøgelser har dog vist, at det er forbundet med store udgifter at separere benene fra inden udfodringen til mink.

### 2.3.6 Økologisk husdyrproduktion

Der er generelt ikke grundlag for at antage væsentlige forskelle i foderets fosforindhold eller udnyttelsen af fosfor mellem økologiske og konventionelle besætninger. Men økologiske besætninger er generelt mere begrænset i deres valg af fodermidler og tilsætningsstoffer end konventionelle, hvilket kan påvirke såvel foderets fosforindhold som tilgængeligheden af fosfor i forhold til i konventionelle besætninger. Desuden er produktionsniveaet ofte lavere, produktionstiden længere og foderforbruget større, hvilket kan medføre højere fosforudskillelse pr. produceret enhed, specielt i kødproduktionen (slagtesvin, kyllinger, slagtekalve/stude) men også hos søer og æglæggende høner.

Der må ikke anvendes tilsætning af mikrobiel fytase i økologiske besætninger, ligesom økologiske svineproducenter gennemsnitligt anvender mindre hjemmeblandet foder med højt naturligt fytaseindhold. Det kan medføre en lidt lavere tilgængelighed af fosfor i økologisk svine- og fjerkræproduktion. Det skal dog nævnes, at interessen for hjemmeblanding af foder er stigende.

På økologiske kvægbrug kan fosforindholdet i foderet være lidt højere, fordi der anvendes større mængder rapskage med højt fosforindhold. Med kravet om 100% økologisk foder er andelen af rapskage dog faldende. Fosforreduktionspotentialet er lidt lavere, mens foderniveaet og dermed fodereffektiviteten formentlig er lidt højere, hvilket samlet set ikke forventes at påvirke fosforudnyttelsen væsentligt.

For økologisk kvæghold er der et strammere harmonikrav på 1,4 DE pr. ha sammenlignet med konventionelt kvæghold, og det kan medføre en mindre mængde fosfor pr. ha (se også 3.8.3).

### 2.3.7 Øget fytaseproduktion i dyr ved bioteknologi

Enmavede dyr har normalt en meget begrænset fytaseproduktion i mavetarmkanalen (Pointillart et al., 1984). Dette betyder, at nedbrydningen af fytatbundet fosfor er begrænset, især i foder og foderstoffer, der ikke indeholder fytase. En mulighed for at øge nedbrydningen af fytat er at skabe husdyr, der har en betydelig egen fytaseproduktion i mavetarmkanalen. Dette er for nylig sket med grise.

#### *The Enviropig ("miljøsvinet")*

Canadiske forskere har udviklet genmodificerede linier af Yorkshire-grise kaldet "the Enviropig<sup>TM</sup>", som producerer enzymet fytase i spytkirtlerne, hvorfra det secernerer sammen med spyttet. Enzymet nedbryder fytat i maven på samme måde som mikrobiel produceret fytase tilsat foderet (Guelph Transgenic Pig Research Program, 2001).

The Enviropig blev produceret ved at koble en lille del af et musegen, som kontrollerer produktionen af et spytprotein i spytkirtlerne, til et fytasegen fra en ikke-patogen *Escherichia coli* (stamme K12). Dette transgen blev indført i befrugtede griseembryoner, som efterfølgende blev implementeret i pseudo-drægtige rugemødre søer (Guelph Transgenic Pig Research Program, 2001). Ved hjælp af denne metode blev 33 "Enviropigs" produceret med det samme transgen (Golovan et al., 2001). Da transgenet sandsynligvis er indsat på forskellige steder i kromosomet hos hver af disse grise, betragtes hver gris som én linie forskellig fra de andre (Guelph Transgenic Pig Research Program,

2001). Fytaseaktiviteten i spyttet varierer betydeligt mellem disse 33 linier (0-6000 U pr. ml 7-11 dage efter fødslen) (Golovan et al., 2001), men linjerne havde tilsyneladende samme sundhedsstatus, tilvækstrate og reproduktive karakteristika som ikke-genmodificerede grise (Guelph Transgenic Pig Research Program, 2001).

Linien WA og JA er de mest testede linier med foderblandinger baseret på majs, hvede, byg og sojaskrå (Golovan et al., 2001; Forsberg, 2003). Der blev fundet en væsentlig forøgelse af fosforfordøjeligheden (op til 99%) og en væsentlig reduktion af fosforudskillelse hos de genmodificerede grise.

Den sande fordøjelighed af fosfor var næsten 100% både hos genmodificerede smågrise og ung- og slagtesvin. Den lille mængde fosfor udskilt med fæces menes at være primært af endogen oprindelse (Golovan et al., 2001). Den store effekt af fytase i spyttet, skyldes ifølge Golovan et al. (2001), at enzymet kontinuerligt tilføres maven i langt større mængder (måske op til 200.000 U pr. kg fortæret foder) sammenlignet med de mængder fytase, som typisk tilsættes foderet (250-2500 FTU pr. kg foder). Dette stemmer imidlertid ikke overens med, at den maksimale fosforfordøjelighed, opnået ved tilsætning af fytase til foderet, ligger på omkring 60-65% selv ved tilsætning af endog høje doser fytase, og at effekten af fytase ved tilsætning af mere end 1250-1500 FTU pr. kg foder når et plateau-niveau (Johansen & Poulsen, 2003).

Spørgsmålet er, hvilken effekt de genmodificerede grise vil have på fordøjeligheden af fosfor under danske fodringsbetingelser, hvor foderblandinger til svin primært er baseret på hvede og byg og proteinkilderne sojaskrå og rapsskrå. Det er kendt, at effekten af mikrobiel fytase tilsat til danske hvede/bygbaserede blandinger ofte er lavere end i udenlandske blandinger typisk baseret på majs, fordi fordøjeligheden af fosfor som udgangspunkt er lavere i majsbaserede blandinger sammenlignet med hvede/bygbaserede blandinger (jfr. figur 2.2). Tilsvarende forventes det, at genmodificerede grise vil have mindre effekt på fordøjeligheden af fosfor i hvede/bygbaserede blandinger sammenlignet med majsbaserede blandinger. I kraft af, at de genmodificerede grise formåede at fordøje stort set al fosforet i de fire forskellige sojaskråblandinger, hvoraf 53% af fosforet var bundet i fytat (Golovan et al., 2001), er det sandsynligt, at fordøjeligheden af fosfor hos genmodificerede grise tildelt en hvede/bygbaseret blanding ikke tilsat uorganisk fosfor (3,5 g totalfosfor/kg foder, hvoraf 60-80% af fosforen er bundet i fytat) vil være minimum 70%. Det betyder, at genmodificerede ungsvin (30-45 kg) og slagtesvin (45-100 kg) vil kunne få deres behov for fosfor dækket uden tilsætning af uorganisk fosfor.

## **2.4 Øget fytaseindhold og reduceret fytinsyreindhold i planter ved hjælp af plantereforædling og bioteknologi**

*Henrik Brinch-Pedersen og Preben Bach Holm*

Kerner og frø oplagrer betydelige mængder fosfor. Den totale mængde fosfor er fordelt som cirka 75% fytatfosfor, 5% uorganisk fosfor og 20% fosfor i andre former f.eks. i DNA, RNA, stivelse, protein og lipider. Fytat kan som den primære fosforforbindelse udgøre op til flere procent af det modne frøs tørvægt (for oversigt over fytatindholdet i cerealer se f.eks. Lott et al., 2002). Fytinsyre

eksisterer fortrinsvis som fytat (figur 2.1), et blandet salt af f.eks kalium, calcium, magnesium, jern og zink. I hvede, byg, rug og havre findes ca. 90% af kernens fytat i aleuronlaget og de sidste ca.10% i embryoets skjoldblad. I majs er situationen omvendt med ca. 90% i skjoldbladet og 10% i aleuron. I tokimbladede findes fytat i endosperm og kimblade.

#### **2.4.1 Biotilgængelighed af fytatbundet fosfor**

Under kernens spiring syntetiseres enzymet fytase, der efterfølgende hydrolyserer fytat, så der frigøres fosfor, *myo*-inositol og mineraler, der kan anvendes af den spirende plante. I modne, tørre kerner har fytaseenzymet dog kun meget svag aktivitet, idet enzymet kræver fugtighed for at være aktivt. Kernens naturlige fytaseindhold har som nævnt betydning for fordøjeligheden af fosfor i dyret i det omfang, foderet opfugtes før udfodring og/eller under fordøjelseprocessen i dyret. Imidlertid er der risiko for at inaktivere fytase ved varmepåvirkning under forarbejdningen af kernerne til foder (se afsnit 2.3). Som nævnt har enmavede kun meget begrænset fytaseaktivitet i deres mave-tarmsystem, og derfor er dyrenes udnyttelse af fytatbundet fosfor lav. Det ufordøjelige fytatbundne fosfor udskilles med dyrets gødning og bidrager til at reducere dyrenes fosforudnyttelse.

#### **2.4.2 Forøgelse af fosfortilgængelighed i planter via planteforædling og bioteknologi**

Ved forøgelse af fosfors biotilgængelighed via bioteknologi og planteforædling har man benyttet sig af transformation af planter for at få en forøget mængde fytase i kernerne (Brinch-Pedersen et al., 2002) og mutationsforædling for at hæmme fytinsyre-biosyntesen (Raboy et al., 2002). Forsøg i modelplanten *Arabidopsis* (gåsemad) har endvidere vist, at det også er muligt at fremstille planter, der har øget evne til at frigøre og optage det fosfor, der traditionelt er blevet betragtet som bundet i jorden (Richardson et al., 2001). Potentialet for denne teknologi er ikke afdækket i andre plantearter. Endeligt er der indledt forskning, der skal afdække mekanismerne omkring oplagring og fordeling af fosfor i den voksende kerne (Brinch-Pedersen, upubliceret). På længere sigt vil sådan viden kunne bruges til at regulere fosforindholdet og sammensætningen i kernen.

#### **2.4.3 Transformation af planter (GMO) for forøget fytaseaktivitet i kernerne**

Målet med denne strategi er at øge mængden af fytaseaktivitet i de modne kerner, så de kan udnyttes direkte i fodersammenhæng med øget fosforoptagelse og reduceret fosforudledning til følge. Forøgelsen opnås ved at indsætte et ekstra fytasegen i planten og udtrykke det under kernefyldningen, så der akkumuleres ekstra fytase i den modne kerne. Når sådanne kerner bliver groft formalede og bliver "inkuberede" i dyrets mave-tarmsystem, vil den ekstra fytaseaktivitet øge nedbrydningen af fytinsyre og derved frigøre mere biotilgængeligt fosfor sammenlignet med en vildtypekerne. Systemet blev første gang demonstreret i tobak (Pen et al., 1993) men er siden blevet udviklet i flere afgrøder (tabel 2.23). Systemets potentiale er så stort, at schweiziske Syngenta nu anvender transgen fytasemajs til billigt at producere varmemestabil fytase i majsplanter, der efterfølgende kan indgå som fodertilsætningsstof (som et alternativ til mikrobielt fremstillet fytase).



**Tabel 2.23 Oversigt over GMO fytase planter og uddrag af fodringsdata**

Uddrag af fodringsdata				
Plante	Dyr	Fytaseniveau i foderet via GMO FTU/kg	P-reduktion i gødning efter anvendelse af GMO fytase planter	Reference
Sojabønner	Slagtekyllinger	1200	53%	Denbow et al., 1998
Raps	Grise	2500	48%	Zhang et al., 2000a,b
(Phytaseed)	Kyllinger	2500	11%	
Ris	-	-	-	Lucca et al., 2001
Hvede	Rotter	1427	under evaluering	Brinch-Pedersen et al., 2000, 2002, 2003
Lucerne	-	-	-	Austin et al., 1994
Tobak	Slagtekyllinger	295	ingen data	Pen et al., 1993

#### 2.4.4 GMO fytaseplanter som foder

Fælles for alle fodringsforsøg med GMO planter er, at der ikke kunne påvises nogen uheldige bivirkninger af GMO fytasefoder eller forringelse af andre foderegenskaber som følge af fytaseudtrykkelsen. Foder med transgene fytasefrø medførte betydelig reduktion i fosforudskillelsen via gødningen således, at effekten var stigende i takt med fytaseaktiviteten.

*Raps:* Fodringsforsøg med grise og slagtekyllinger er gennemført med rapssorten Phytaseed (BASF), som vist i tabel 2.23. Tilvækstsdata, analyser af knogler og fordøjelighed af fosfor, calcium og tørstof viste, at effekten af Phytaseed fytase var identisk med effekten af tilsætning af mikrobiel syntetiseret fytase (Zhang et al., 2000a,b). Størst effekt af Phytaseed kunne observeres hos grise, hvorimod effekten i kyllingefoder var betydeligt mindre.

*Sojabønner:* Detaljerede fodringsforsøg er gennemført med GMO fytase sojabønner til slagtekyllinger. Tilsætning af fytase via GMO sojabønner øgede fosforfordøjeligheden og reducerede fosforindholdet i gødningen signifikant.

*Hvede:* Der er i dansk regi gennemført fodringsforsøg med GMO fytasehvede til rotter. Forsøget er under evaluering (Brinch-Pedersen og Poulsen, upubliceret).

#### 2.4.5 Mutationsforædling for hæmning af fytinsyrebiosyntesen

Målet med denne strategi er at reducere fytatindholdet i afgrøderne via de såkaldte "low phytic acid" (*lpa*) mutationer. Totalfosforindholdet i disse lavfytat-mutanter er det samme som i vildtypen, men i stedet for fytatbundet fosfor indholder kernerne større mængder uorganisk fosfor, der i foder-sammenhæng er biotilgængeligt. Det er lykkedes at finde *lpa* mutationer i majs og byg samt til en vis grad i ris (tabel 2.24). Længst fremme er majs *lpa* mutanter, der har indgået i flere intensive forædlingsprogrammer med henblik på at skabe elitesorter med højt udbytte og højt indhold af biotilgængeligt fosfor. Fra vækståret 2003 vil canadiske landmænd således kunne anvende den såkaldte HAP (High Available Phosphorus) majs

([http://www.pioneer.com/canada/crop\\_management/hap\\_corn.htm](http://www.pioneer.com/canada/crop_management/hap_corn.htm)). Der arbejdes i udlandet på at skabe en lignende bygsort.

**Tabel 2.24 Oversigt over lavfyttat-mutanter og uddrag af fodringsdata**

Plante	Uddrag af fodringsdata		Reference
	Dyr	P-reduktion i gødning efter anvendelse af GMO fytaseplanter	
Majs	Kyllinger	Ca. 40%	Raboy et al., 2002
	Grise		Ertl et al., 1998
	Regnbueørreder		Spencer et al., 2000 Sugiura et al., 1999
Byg	Grise	40-50%	Raboy et al., 2002
	Kyllinger		Sugiura et al., 1999
	Kalkuner		Veum et al., 2002
	Regnbueørreder		Li et al., 2001a,b
	Rotter		Poulsen et al., 2001
Ris	-	-	Larson et al., 2000

#### 2.4.6 Erfaringer med lavfyttat-mutanter som foder

*Majs*: Foderegenskaberne af lavfyttat-majs er blevet intensivt karakteriseret (tabel 2.24) og har vist, at fosfortilgængeligheden i mutanterne er øget fra ca. 25 til 75% sammenlignet med en normal vildtype. Udledningen af fosfor via gødningen var reduceret op til ca. 40%. På andre områder har *lpa* mutanterne ingen reduceret næringsværdi i forhold til vildtype.

*Byg*: Også bygmutanterne er blevet evalueret i adskillige fodringsforsøg (tabel 2.24). Det er samstemmende for alle forsøg, at *lpa* mutanterne overordnet ikke har nogen reduceret næringsværdi. I alle tilfælde beskrives op til cirka dobbelt så stor fosforfordøjelighed og en kraftig reduktion af fosforindholdet i gødningen.

#### 2.4.7 Muligheder for at reducere totalfosforindholdet i kerner og frø

Selv om der i fodersammenhæng anvendes fytase- eller lavfyttatmutanter, vil der stadig være betydelige mængder fosfor, der passerer igennem dyret og bidrager væsentligt til husdyrenes fosforudskillelse. Ved et totalfosforindhold på ca. 1,5% af tørvægten i korn, ca. 0,7 og 1% i henholdsvis sojabønner og rapsfrø vil en betydelig del af det totale fosfor i princippet kunne undværes uden, at det får negativ betydning for de ernæringsmæssige kvaliteter. Den generelt dårlige udnyttelse af fosfor i fodersammenhæng vil altså kunne forbedres væsentlig ved anvendelse af sorter med reduceret totalfosforindhold.

Mekanismerne, der fordeler fosfor på de forskellige fosforforbindelser i kernen, er stort set ukendte. Viden om disse mekanismer vil være meget nyttig og åbne muligheder for op- og nedregulering af specifikke gener, som er centrale for f.eks. fytatakkumuleringen.

Heller ikke variationer i de genetiske ressourcer, der påvirker kernens totale fosforindhold, er karakteriseret. Det er dog tænkeligt, at især indholdet af fytatfosfor, der primært fungerer som lagerforbindelse, kan variere imellem forskellige varieteter. Selv genetiske forskelle, der medfører små reduktioner (f.eks. en reduktion af fytatfosfor på 10-15%) vil kunne bidrage betydeligt til en samlet reduktion af fosforudledningen.

Endvidere bør det nævnes, at fosforindholdet i kernen kan påvirkes betydeligt af plantens vækstmiljø. Det er f.eks. fundet, at lavere mængde tilgængeligt vand til hvede og tidligere høsttidspunkt i sojabønner reducerer mængden af fosfor i kernen signifikant (Yao et al., 1983; Kim et al., 2002). Desværre har sådanne dyrkningsmæssige foranstaltninger også negativ effekt på det samlede udbytte for afgrøden og er derfor næppe realistisk.

#### **2.4.8 Konklusion**

Der foreligger effektive muligheder inden for bioteknologi og planteforædling for at frembringe sorter, der anvendt i fodersammenhæng vil kunne reducere fosforudledningen via husdyrgødningen. Længst fremme er GMO fytaserapsen Phytaseed, Syngentas transgene majs til produktion af fytase og HAP majs baseret på *lpa-1* mutationen. Dyrkning af gensplejsede fytaseafgrøder er i øjeblikket ikke realistisk under danske forhold. Med hensyn til HAP afgrøder er det sandsynligt, at fremtiden vil byde på andre alternativer end majs, f.eks. byg. Perspektiverne er, at behovet for tilskud af foderfosfat vil blive mindre, hvis andelen af fytatbundet fosfor reduceres, og/eller mængden af fytase øges. Planteforædling, herunder GMO, vil således kunne bidrage til, at behovet for tilskud af foderfosfat fortsat mindskes eller helt fjernes. På lang sigt kan det vise sig, at reduceret oplagring af fosfor (total) kunne blive relevant med henblik på en effektiv udnyttelse af fosfor i jordbruget.

### **2.5 Fodringsrelaterede virkemidler og deres effekt på fosforudskillelsen i husdyrgødning**

*Hanne Damgaard Poulsen og Jakob Sehested*

De foregående afsnit 2.2, 2.3 og 2.4 beskriver den aktuelle fosforsituation og potentialet for at reducere fosforudskillelsen hos svin, kvæg, fjerkræ og mink samt mulighederne for gennem planteforædling (herunder GMO) at forbedre egnetheden af cerealier og proteinafgrøder som fosforkilde til husdyr. Videnniveauet er summeret i tabel 2.25 i 14 grupper: (1) husdyrenes fysiologiske behov, (2) foderets indhold, (3) fordøjelighed, (4) fodringsnormer, (5) valg af foder (råvarer), (6) foderfosfat (mineralsk fosfat), (7) fodereffektivitet, (8) individuel tilpasset fodring, (9) fytasetilsætning, (10) varmebehandling af foder, (11) vådfodring, (12) GMO-planter, (13) GMO-husdyr og (14) økologisk jordbrug.

I tabel 2.26 er vist en oversigt over de fodringsrelaterede tiltag, der påvirker fosforudskillelsen hos husdyr. De fleste tiltag vil kunne tjene som virkemiddel til påvirkning af husdyrgødningens fosforindhold. Det største potentiale knytter sig til enzymet fytase, som øger fordøjeligheden af det naturligt forekommende fosfor, hvorved behovet for tilskud af foderfosfat begrænses. Fytaseeffekten kan opnås gennem det naturligt forekommende fytase, gennem tilsætning af fytase eller gennem en kombineret anvendelse af både naturligt og tilsat fytase. I sidstnævnte tilfælde tilsættes en mængde

mikrobiel fytase, der er tilpasset mængden af naturligt forekommende fytase i foderet. Dette kan være stort, hvor der f.eks. er tale om ikke-varmebehandlet foder og lille, hvor der er tale om varmebehandlet foder. Tidshorizonten for de fleste virkemidler vurderes at være kort eller mellemlang (dvs. inden for en 10-årig periode). Alle fodringsmæssige virkemidler vurderes at være af generel karakter men kan selvfølgelig også bruges regionalt.

Det samlede aktuelle forbrug af foderfosfat er beregnet til at ligge på 17.800 tons, hvor forbruget fordeler sig med 64, 25 og 11% på svin, kvæg og fjerkræ (se afsnit 2.2.4). Det umiddelbare potentielle for at reducere fosforudskillelsen ligger i at mindske brugen af foderfosfat. Det forudsætter anvendelse af fytase (naturligt og mikrobielt) og forbedret udnyttelse af det naturligt forekommende fosfor, reducerede fodringsnormer samt forbedret foderudnyttelse. Det vurderes, at behovet for tilskud af foderfosfat kan reduceres til 6.000 tons pr. år. Det betyder, at fosforudskillelsen derved kan reduceres med omkring 11.800 tons, som fordeler sig på svin, kvæg og fjerkræ med ca. 8.000, 3.000 og 800 tons fosfor. Dette svarer til en reduktion på 23% i forhold til den samlede fosforudskillelse i husdyrgødning, som aktuelt ligger på ca. 52.000 tons (tabel 2.9). En del af reduktionen i foderfosfatforbruget gennem tilsætning af fytase til svine- og fjerkræfoder vil allerede på nuværende tidspunkt kunne realiseres, men der er stadig begrænsninger i vores viden om fytase under danske forhold, så der kræves både en forskningsmæssig indsats og en efterfølgende implementeringsproces, før den fulde effekt vil kunne opnås. Tilmed vil ny forskning måske også frembringe nye fytaseprodukter eller cerealier/proteinafgrøder med et lavere indhold af fytatbundet fosfor eller højere indhold af fytase, som kunne bidrage til yderligere reduktioner.

Da der ikke bruges foderfosfattilskud i pelsdyrfoder, bidrager pelsdyrproduktionen ikke til dette fald, til trods for at fosforudnyttelsen er lavest hos pelsdyr. Nedsættelse af fosforudskillelsen hos pelsdyr vil primært kræve ændret valg af råvarer mod foderstoffer med et lavere fosforindhold eller tiltag til at reducere foderforbruget.

Den mest brugte type foderfosfat er som nævnt monocalciumfosfat (MCP), men mononatriumfosfat (MSP), som har en højere tilgængelighed end MCP, kan produceres i de mængder, der i givet fald vil være behov for. Der kan dog være andre årsager til, at MSP ikke umiddelbart kan erstatte MCP som foderfosfatkilde, idet MSP er hydrofil og vil kunne give anledning til sammenklumpning og problemer med blandesikkerhed mv. ved foderfremstilling. Det kan heller ikke udelukkes, at erstatning af MCP med MSP kan have utilsigtede negative fysiologiske reaktioner, herunder ændringer i strøelseskvaliteten hos fjerkræ som følge af ændringer i vandforbrug. Dette kan så medføre trædepudesvidninger.

Det vurderes, at en reduktion i fosforudskillelsen svarende til et mindsket foderfosfatforbrug på omkring 11.800 tons medfører, at der årligt på landsplan gennemsnitligt tilføres knap 5 kg mindre fosfor pr. ha (dyrket areal undtaget permanent brak). Den gennemsnitlige årlige fosfortilførsel med husdyrgødning var omkring 22 kg pr. ha i for 2000/2001 og omkring 20,8 kg fosfor pr. ha i 2002 (52.000 tons på landsplan) pr. år på landsplan. Den skitserede reduktion i forbruget af foderfosfat vurderes derfor at medføre, at den gennemsnitlige fosfortilførsel med husdyrgødning kan reduceres til omkring 15,8 kg pr. ha pr. år på landsplan. Det vurderes desuden, at det beregnede gennemsnitli-

ge fosforoverskud på 13,4 kg pr. ha i 2000/2001 (Kyllingsbæk, personlig meddelelse) vil falde til omkring 7,2 kg pr. ha, idet det antages, at reduktionen i foderfosfat ikke modsvarer af en stigning i forbruget af handelsgødningsfosfat eller stigning i husdyrproduktionen. Det kan her nævnes, at det gennemsnitlige fosforbidrag fra handelsgødning (7 kg) og slam (2 kg) ligger på 9 kg pr. ha i 2000/2001 (jfr. figur 1.1).

Produktivitetsstigninger i husdyrbruget vil som nævnt medføre en mindre reduktion i fosforudskillelsen. Under antagelse af, at denne reduktion beløber sig til omkring 1.000 tons over 5-10 år, vil det kunne betyde en yderligere reduktion i fosforudskillelsen på knap 0,5 kg pr. ha på landsplan.

For nuværende er det ikke realistisk fuldstændigt at undgå tilskud af foderfosfat, idet det vil kompromittere dyrenes sundhed og produktion. Men hvis dette bliver muligt gennem forskning og udvikling, vil et fuldstændigt stop for brugen af foderfosfater betyde en yderligere reduktion i fosfortilførslen med husdyrgødning på omkring 2,5 kg pr. ha. Der antages uændret husdyrproduktion. Overskuddet vil da være reduceret til ca. 6 kg pr. ha gennemsnitligt på landsplan (alt andet lige, herunder at foderfosfat ikke erstattes af et øget forbrug af handelsgødningsfosfor).

**Tabel 2.25 Sammen drag og potentiale for kvæg, svin, fjerkræ og mink**

	Kvæg	Svin	Fjerkræ	Mink	Generel konklusion
<b>Viden-niveau</b>					
<b>1. Fysiologisk behov</b>	Veldokumenteret. Dog usikkerhed om behov til obligatorisk endogen tab ("vedligehold")	Behov til smågrise og slagtesvin kendes ret godt; Mangler viden om søernes behov	Æglæggende høners behov er dårligt defineret. Slagtekyllingers behov kendes	Behovet er ikke godt belyst.	Behovet ikke særlig godt fastlagt, hvorfor fodringsnormerne ofte inkluderer en betydelig sikkerhedsmargen
<b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	Malkekøer ++; Andre +	Søer: ++; Smågrise (+); Slagtesvin (+)	++	+	
<b>2. Foderets indhold</b>	Gns. indhold veldokumenteret. Mangler viden om variation. Mulighed for analyse af foder i praksis	Gns indhold veldokumenteret. Mangler viden om variation. Mulighed for analyse af foder i praksis	Som kvæg og svin	Veldokumenteret	Der er generelt god viden om fodermidlernes gns. indhold af P, men variationen mellem og indholdet i de enkelte foderpartier er ofte ukendt
<b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	+	+	+		
<b>3. Fordøjelighed af fosfor</b>	Der mangler viden. Usikkerhed om betydningen af fytase og varmebehandling	Ikke tilstrækkeligt belyst. Usikkerhed om betydningen af fytase, vådfodring og varmebehandling	Der mangler viden. Usikkerhed om betydningen af fytase og varmebehandling	Ikke særlig godt belyst	Der mangler viden, hvilket indgår som sikkerhedsmargen i fodringsnormerne. For kvæg og svin er der dog grundlag for at antage højere gns. fordøjelighed i foderet end hidtil
<b>Potentiale <sup>1)</sup></b> <b>- fodertype</b> <b>- mineraltype</b> <b>- fytase</b>	+ ++ ? (ikke undersøgt)	++ + ++	++ + ++	Ikke undersøgt, da foderets fosforindhold overstiger dyrenes behov	
<b>4. Fodringsnormer</b>	Fodringsnormerne er ved at blive opdateret ud fra nyere viden om 1, 2 og 3, men foderets indhold ligger ofte over normen	Fodringsnormerne justeres i takt med ny viden. Normerne bedst dokumenterede for smågrise og slagtesvin	Normerne afspejler den manglende viden om 1, 2 og 3	Foderets naturlige indhold ligger langt over normen	Normerne afspejler den manglende viden om 1, 2 og 3
<b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	++	+	+	(+)	
<b>Anvendelse af viden i praksis</b>					
<b>5. Valg af foder (råvarer)</b>	Vanskelig pga. mgl. viden om fosforford. Evt. afhængig af sædskifte. Størst valgmulighed for kraftfoder	Vanskelig da foderet er baseret på foderstoffer med en stor andel af fosfor bundet i fytat	Vanskelig da foderet er baseret på foderstoffer med højt naturligt fytatindhold	Vanskelig pga. anvendelsen af animalske og fiskeaffaldsprod.	Valg af fodermidler hænger delvist sammen med sædskiftet. Fodermidlerne har en stor andel af fosfor bundet i fytat. Desuden mangler der viden at vælge ud fra
<b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	(+) på kort sigt	(+) på kort sigt	(+) på kort sigt		

<b>6. Mineralske foder-fosfater</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b> <b>- type (tilg.)</b> <b>- udeladelse</b>	Bruges i varierende omfang til alle dyregrupper. Varierende kvalitet, som ofte er ukendt. Er oftest blandet med andre mineraler  ++ +++	Tilskud bruges. Frivillig aftale om brug af monocalciumfosfat som tilskudskilde (høj fordøjelighed på 67%)  + ++ (søer og slagtesv); + (smågrise)	Tilskud bruges  ++ ++ (æglægger) + (slagtekyll)	Tilskud bruges ikke. Får kun fosfor fra råvarerne  - -	Ikke alle bruger tilskud af foderfosfater. Mulighed for (1) at vælge typer med høj fordøjelighed, (2) at erstatte fosfater ved tilsætning af fytase
<b>7. Foder-effektivitet</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b> <b>- avl</b> <b>- fodring management</b>	Der mgl viden, men forbedringer sker løbende  + (lang sigt) ++ ++	Sker løbende  + (lang sigt) + ++	Sker løbende  + ++ +	Sker løbende  Meget lille	Forbedret fodereffektivitet vil medføre forbedret fosforudnyttelse
<b>8. Individuel tilpasset fosfor-fodring</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b> <b>- individuel</b> <b>- gruppeopdelt</b>	Indiv. fodring vanskelig, men alle dyr fodres i mere eller mindre homogene grupper. Foderautomater potentiel mulighed for indiv. fodring  (+) (foderaut.) + malkekøer	Indiv. fodring vanskelig. Dyrene fodres i rimeligt homogene grupper  - søer: +++; smågrise (+); slagtesvin ++	Indiv. fodring vanskelig. Dyrene fodres i rimeligt homogene grupper  - æglæggere: + slagtekyll.: (+)	- -	Dannelsen af grupper afh. af prod. system og staldanlæg. Der er potentiel mulighed for bedre tilpasset fosfortildeling i grupperne
<b>9. Fytasetilsætning</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	Bruges ikke. Effekt ikke undersøgt  ?	Bruges i begrænset omfang, dog stigende  Effekt afhænger af foderets egen fytaseaktivitet	Bruges i begrænset omfang  Effekt afhænger af foderets egen fytaseaktivitet	Bruges ikke	Bruges hos enmavede, hvor fytase reducerer behovet for foderfosfat  Effekt afhænger af foderets egen fytaseaktivitet
<b>10. Varmebehandl. (salmonella)</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b> <b>(negativ)</b>	Der er risiko for reduceret fosfortilgængelighed  Nye studier indikerer reduceret fosforfordøjelighed	50% af svinefoder fremstilles på denne måde  Negativt, men der kan kompenseres ved at tilsætte mikrobiel fytase	Hel hvede bruges til slagtekyllinger  Negativt, men der kan kompenseres ved at tilsætte mikrobiel fytase	Ikke undersøgt	Inaktiverer naturligt fytase. Fosforfordøjeligheden nedsettes med op mod 20%. Øger behovet for tilsætning af mikrobiel fytase

<b>11. Vådfodring og fermenteret foder</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	Ensilering af kornkerner er en potentiel mulighed	Ikke undersøgt. Vådfodring er udbredt i svineproduktionen. Gastæt opbevaring af korn måske en mulighed  Ikke klarlagt	Ikke relevant	Ikke relevant	Kan medføre en forøget forbrug af fosfor og dermed reduceret behov for tilsætning af foderfosfat
<b>12. GMO-planter Fytaseforbedret</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	Ikke undersøgt  ?	Sparsomt undersøgt  Kendes ikke pt. fuldt ud. Alternativ til mikrobiel fytase	Sparsomt undersøgt  Kendes ikke pt. fuldt ud. Alternativ til mikrobiel fytase	Ikke undersøgt	Alternativ til mikrobiel fytase. Effekt kendes ikke fuldt ud
<b>13. GMO-husdyr Fytaseforbedret</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	? (-)	GMO-gris med øget spyttsekretion af fytase  ? (+)			Alternativ til mikrobiel fytase. Effekt kendes ikke fuldt ud
<b>14. Økologisk jordbrug</b>  <b>Potentiale <sup>1)</sup></b>	Der er ikke grundlag for at antage væsentlige forskelle mellem økologiske og konventionelle besætninger	Der må ikke anvendes mikrobiel fytase og økologer anvender gns mindre hjemmeblandet foder med højt naturligt fytaseindhold. Derfor må forventes en lidt lavere gns. tilg. af fosfor i økologiske besætninger	Der må ikke anv. mikrobiel fytase i foderet. Derfor må forventes en lidt lavere gns. tilg. af fosfor i økologiske besætninger	?	Der må ikke anvendes mikrobiel fytase i foderet, men i øvrigt er der ikke grundlag for at antage væsentlige forskelle mellem økologiske og konventionelle besætninger

<sup>1)</sup> - (intet); + (lille); ++ (medium); +++ (stor)



**Tabel 2.26 Virkemidler vedr. begrænsning af husdyrgødningens indhold af fosfor vha. fodringsmæssige tiltag**

Virkemiddel	Virkemåde	Tidshorisont <sup>1)</sup> (kort/mellemlangt/ langt sigt)	Hvor sikkert er det, at virkemidlet har effekt (ukendt, usikker, sikker)	Skønnet virkning (stor, medium, lille)	Andre positive/negative effekter og begrænsninger
Valg af foderstoffer (råvarer)	Valg af foderstoffer med høj fosfordøjelighed	Lang	Sikker	Lille/medium <sup>2)</sup>	Behov for fosfattilskud mindsket Problemer med affalds/biprodukter
Valg af foderfosfat og reduceret forbrug	Valg af foderfosfater med høj fordøjelighed	Kort	Sikker	Medium/stor <sup>2)</sup>	Fytase i foderet (naturligt og/eller tilsat) mindsker behovet for tilskud af foderfosfat
Fodringsnormer (fysiologisk behov)	Optimere foderets indhold til dyrenes behov tilpasset deres livsytringer	Mellemlang <sup>2)</sup>	Sikker	Lille/medium <sup>2)</sup>	Kræver øget forskningsmæssig dokumentation for behov
Fasefodring (tilpasset fodring)	Tilpasset fosfortildeling gennem anvendelse af flere forskellige fosfordoseringer gennem eksempelvis produktionsperioden	Kort/mellemlang <sup>2)</sup>	Sikker	Lille/medium <sup>2)</sup>	Kræver øget forskningsmæssig dokumentation for behov Kræver præcis foderoptimering Kræver installationer af nye fodringsanlæg mv.
Fytasetilsætning	Øger fodøjeligheden af det fytatbundet fosfor i vegetabiliske foderstoffer (kerner og frø)	Kort/mellemlang <sup>2)</sup>	Sikker effekt, men effektens størrelse delvist ukendt	Medium/stor <sup>2)</sup>	Kræver øget forskningsmæssig dokumentation under danske produktionsbetingelser Kræver påsprøjtningsanlæg (foderfabrikker)
Varmebehandling af korn (Salmonella handlingsplan) (negativ virkemiddel)	Inaktiverer plante-fytase og nedsætter fordøjeligheden af fytatbundet fosfor i frø og kerner		Sikker negativ		Som kompensation kræves ekstra tilskud af foderfosfat eller tilsætning af mikrobiel fytase Sker i dag på foderfabrikker
Ikke-varmebehandlet korn herunder hel hvede	Plantefytase bibeholdes og fordøjeligheden af fytatbundet fosfor i frø og kerner stimuleres	Kort	Sikker	Medium/stor <sup>2)</sup>	Mindsker behov for fosfattilskud Kræver ingen/lille tilsætning af fytase <sup>2)</sup> Kræver nye anlæg på foderfabrikker

Fytase-/fytinsyre-forbedret korn (GMO)	Øget indhold og kvalitet af fytase i korn, eller mindre andel af fytatbundet fosfor i korn. Begge medfører højere fordøjelighed af fosfor. Evt. varmestabil fytase som tåler varmebehandlingen på foderfabrikkerne	Mellemlang/lang	Delvist ukendt	Lille/medium <sup>2)</sup>	Afhænger af fytasens effekt på fordøjeligheden af fosfor Udbyttet af de nye sorter Vurderes i forhold til effekt af mikrobiel fytase
Varmestabil fytase	Inaktiveres ikke under opvarmning af foderet	Mellemlang/langt	Delvist ukendt	Lille/medium <sup>2)</sup>	Kræver viden og udvikling Kan gælde både for plantefytase og mikrobiel fytase til tilsætning
Vådfodring	Formodes at øge fordøjeligheden af fytatbundet fosfor	Mellemlang	Ukendt	Lille/medium (svin)	Kræver forskningsmæssig dokumentation Kombineres med fytase Mindsker behov for fosfattilskud
Fodereffektivitet	Mindre foderforbrug (og dermed fosfor) pr. kg produkt (kød, mælk, æg mv.)	Mellemlang/lang	Sikker	Lille <sup>2)</sup>	Kræver fortsat avlsfremgang Kræver forbedring af management, foder-vurdering mv.
GMO-gris	Øger fordøjeligheden af fosfor gennem øget secerner-ning af fytase med spyttet	?	Ukendt	?	Samme effekt opnås formentlig gennem fodringsmæssige tiltag (fytase mv.) under danske fodringsbetingelser
Økologisk jordbrug	Gennem restriktioner i anvendelse af foderimport til bedriften og antal dyr pr. ha	?	?	?	

<sup>1)</sup> Kort = mindre end 5 år; mellemlang = 5-10 år; lang = over 10 år.

<sup>2)</sup> Afhænger af husdyrart.

### 3. FOSFOROMSÆTNING I OG -TAB FRA MARKEN

#### 3.1. Fosfortab fra det dyrkede areal – generelle betragtninger

*Gitte Holton Rubæk, Brian Kronvang og Goswin Heckrath*

Den andel af det samlede fosfortab til vandmiljøet, som kommer fra landbruget, er steget fra omkring 20% i slutningen af firserne til omkring 50% i slutningen af halvfemserne. Denne relative stigning skyldes store reduktioner i fosforudledningerne fra spildevand.

Der har ikke kunnet påvises signifikante ændringer i det absolutte tab af fosfor fra diffuse kilder (landbrug, spredt bebyggelse og baggrundsbidrag) ved målinger af fosfor i vandløb under det landsdækkende overvågningsprogram (NOVA) siden 1989. Målingerne viser derimod, at det diffuse fosfortab fra landbruget til vandmiljøet (dyrkningsbidraget) varierer meget fra år til år på grund af varierende vejrforhold. De forbedrede måleprogrammer under NOVA (fra 1998) i form af meget intensiv prøvetagning i vandløb har ydermere vist, at fosfortabet fra landbruget har været underestimeret pga. måleteknikken. Det er især tabet af fosfor bundet til små jordpartikler (partikulært fosfor), der tidligere var undervurderet. Desværre er det ikke muligt at dokumentere fosfortabet fra diffuse kilder på nationalt niveau før 1989 på grund af manglende tidsserier. Dyrkningsbidraget beregnes i NOVA som den del af det samlede tab, der ikke kan tilskrives andre kilder. Dyrkningsbidraget er derfor fastsat med relativ stor usikkerhed.

I perioden fra 1989 og frem til 2001, hvor fosfortabet fra det dyrkede areal er blevet monitoreret, er der sket en absolut ophobning af fosfor på landbrugsarealerne på samlet set godt 200 kg pr. ha. Denne ophobning har ikke umiddelbart ført til målbare stigninger i det monitorerede fosfortab fra det dyrkede areal, hvilket formentlig skyldes en kombination af andre ændringer i perioden, f.eks. i driften af det dyrkede areal og i udledningerne fra og opgørelsen af andre diffuse kilder. På det dyrkede areal har specielt håndteringen af husdyrgødning ændret sig, og mange af de tiltag, man her har gjort for at øge udnyttelsen af kvælstoffet, har også haft en tabsbegrænsende effekt overfor fosfor. Ligeledes har der været fokus på at etablere to meters bræmmer omkring vandløb, og vandløbsvedligeholdelsen har også ændret sig mod det mere skånsomme. Begge disse ændringer har givetvis også haft en tabsbegrænsende effekt over for fosfor. Præcisionen i fastsættelsen af de øvrige tabsbidrag kan også have ændret sig i perioden. Hvis f.eks. bidraget fra spredt bebyggelse i stigende grad er overestimeret i perioden, vil dette resultere i en stigende underestimering af dyrkningsbidraget. Også den store vejrbedingede årlige variation i fosfortabet fra diffuse kilder gør det vanskeligt at erkende eventuelle små ændringer i fosfortabet ud fra en forholdsvis kort tidsserie på godt 10 år.

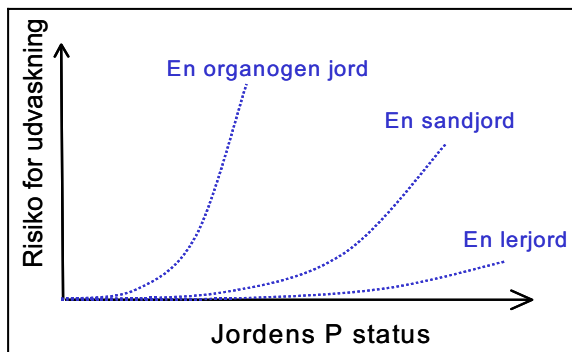
Disse problemstillinger vil også gøre sig gældende i fremtiden. Ved målinger af det samlede tab i vandløbet vil en positiv effekt af f.eks. reduceret overskudsfosfor sandsynligvis let kunne overskygges af en negativ effekt på transportvejene for fosfor, eksempelvis effekten af øget nedbør. Hertil kommer, at et skifte i jordens fosforpuljer er en langsom proces, hvorfor resultatet af ydre ændrin-

ger i form af mindre fosfortildeling først kan forventes at være målbar med en vis tidsforsinkelse både i jordvand, drænvand og vandløb.

Fosfor kan tabes som opløst og partikulært bundet organisk eller uorganisk fosfor. I hvilke mængder de forskellige fosforformer tabes varierer for forskellige tabshændelser. Et præcist kendskab til fosforformerne er altafgørende for en korrekt forståelse af tabsprocesserne. Ved målinger af fosfortab bliver der ofte kun analyseret for total-fosfor og for opløst uorganisk fosfor. I sådanne måleprogrammer bliver opløst organisk fosfor primært opfattet som partikulært bundet fosfor, og det er ikke muligt at skelne mellem organisk og uorganisk bundet partikulært fosfor.

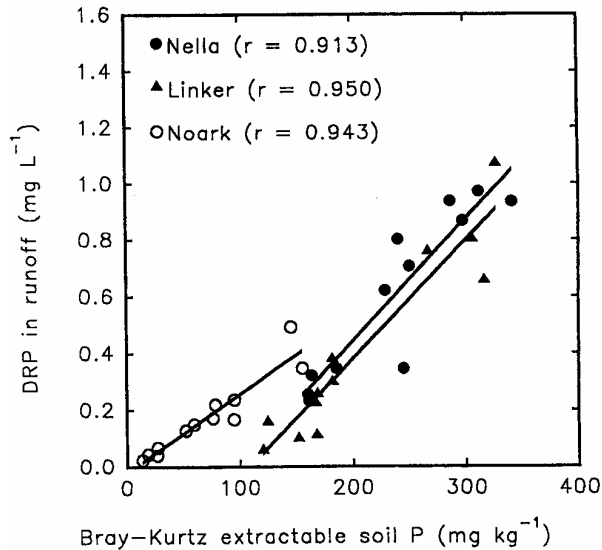
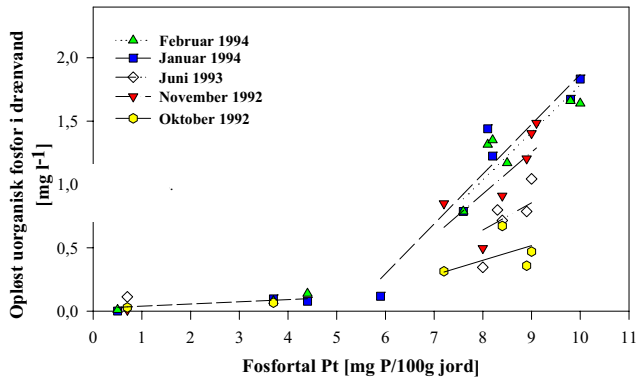
Tabet af partikelbundet fosfor fra dyrkede oplande udgør i mange situationer mere end halvdelen af det totale fosfortab, men der er store variationer i, hvilken form fosforet tabes på fra opland til opland. Partikelbundet fosfor tilføres ferske vande via vind-, vand- og brinkerrosion og fra kunstigt drænedede arealer. Tab af opløst fosfor fra landbrugsjord sker via overfladeafstrømning og udvaskning fra landbrugsjord til dræn og øvre grundvand. Den tidlige variation i fosfortabet fra det dyrkede areal er stor, fordi store fosfortab er knyttet til kraftige nedbørshændelser og tørtbrud. Dyrkningsbidraget i våde år kan f.eks. let være mere end 5 gange større end dyrkningsbidraget i de mest tørre år. Det er også vigtigt at gøre sig klart, at overfladevand kan tilføres betydelige mængder opløst fosfor fra dybere grundvand stammende fra naturlige aflejringer. Fosforindholdet i dybere grundvand varierer stærkt afhængigt af, hvilke aflejringer grundvandet stammer fra.

Jo mere fosfor, der er akkumuleret i jorden, jo mere vil der, alt andet lige, kunne tabes. I figur 3.1 ses en principskitse af risikoen for fosforudvaskning som funktion af jordens fosforstatus. Aktuelt er vidensgrundlaget for spinkelt til at kunne kvantificere sammenhænge og vurdere hvor dybt et jordlag der bør tages i betragtning for forskellige danske jord-, recipient- og klimasituationer.



**Figur 3.1** Principskitse, der illustrerer, hvordan risikoen for fosfortab ved udvaskning stiger med stigende mængder fosfor i jorden. For danske forhold eksisterer der ikke et tilstrækkeligt datagrundlag til at kvantificere sammenhænge og til at vurdere, hvor dybt et jordlag der bør tages i betragtning under forskellige jordbundsforhold. For lerjorde vil risikoen for udvaskning i gængs forstand være lille. På disse jorde kan nedvaskning via makroporer til dræn af opløst og partikelbundet fosfor til gengæld udgøre et problem, som ikke illustreres af denne figur.

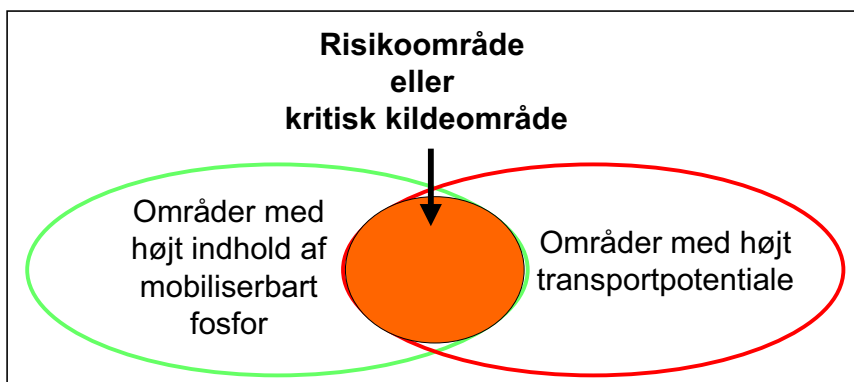
Der findes flere udenlandske undersøgelser, der har demonstreret sammenhænge mellem fosforstatus i jorden og fosfortabet fra jorden via forskellige tabsveje fra enkelte marker eller delmarker, hvor transportforholdene er nogenlunde identiske, men hvor fosforstatus har varieret (Heckrath et al., 1995; Pote et al., 1996; Pote et al., 1999; Sims et al., 1998; Leinweber et al., 1999; Chardon & Schoumans, 2002; se også eksempler i figur 3.2). Disse sammenhænge er gældende for både overfladeafstrømning og udvaskning fra sand- og lerjorde med en fosforstatus der er sammenlignelig med dem, som typisk findes i Danmark.



**Figur 3.2** Sammenhæng mellem fosforstatus i jord målt som fosfortallet og koncentrationen af fosfor målt i vand fra drænrør (øverst) (efter Heckrath et al., 1995) og (nederst) fosforstatus i jord målt ved Bray/Kurtz-metoden og koncentrationen af opløst fosfor i overfladeafstrømmende vand for 3 forskellige jordtyper (DRP: opløst uorganisk fosfor) (Pote et al., 1999).

Fosfortab fra det dyrkede areal er også præget af meget stor rumlig variation, uanset hvilken tabsproces, der måtte være aktiv. Dette er blevet anskueliggjort ved en amerikansk undersøgelse, der anslog, at omkring 10% af det dyrkede areal leverede omkring 90% af det diffuse fosfortab i det undersøgte opland (Pionke et al., 1997).

En naturlig følge af den store rumlige variation i fosfortabet er at forsøge at identificere de områder i et opland, der yder det største fosfortab. Det skyldes, at en særlig indsats mod fosfortabet fra sådanne områder vil have langt større og hurtigere effekt end generelle reguleringer på hele det dyrkede areal. Et sådant risikoområde, også kaldet kritisk kildeområde, er karakteriseret ved, at det både har et stort indhold af mobiliserbart fosfor, og at en effektiv transportvej forbinder området med vandmiljøet (figur 3.3). Dette betyder også, at et højt indhold af mobiliserbart fosfor kun er umiddelbart kritisk for vandmiljøet, hvis der også eksisterer en effektiv transportvej, som forbinder området med vandmiljøet.



**Figur 3.3** Et risikoområde – eller kritisk kildeområde – er et areal, der både har et højt indhold af mobiliserbart fosfor og en effektiv transportvej, der forbinder området med vandmiljøet. Effektive transportveje omfatter både de overjordiske (erosion og overfladisk afstrømning) og de underjordiske transportveje (overfladenær grundvandsafstrømning eller afstrømning via dræn).

Under danske forhold er fosfortab fra landbrugsjorde kun undersøgt i rumligt begrænsede og velbeskrevne systemer som lysimeter- og plotforsøg. Undersøgelserne omfatter f.eks. målinger af fosforstatus i jorden uden samtidige målinger af det faktiske fosfortab (e.g. Rubæk et al., 2000) eller undersøgelser af en eller få tabsprocesser i laboratoriet, i plotforsøg eller i meget begrænsede geografiske områder (e.g. Jensen et al., 1999; Sibbesen, 1995; Rubæk et al., 2002; de Jonge et al., 2002). Det komplekse samspil mellem forskellige tabsprocesser samt den rumlige variation af fosforstatus på mark og oplandsniveau er således ikke undersøgt under danske forhold. Hidtil har målinger af fosfortab fra landbrugsjord under danske forhold da også kun kunnet forklare en del af det samlede tab, der måles i vandløbene (Kronvang et al., 2000).

Vurdering af risikoen for fosfortab fra landbrugsarealer kræver derfor både indsigt i jordens fosforstatus, dens egenskaber mht. fosforbinding og –frigivelse og viden om transportprocesserne. Fosfo-

ret transporteres overvejende med vand eller vind. Klimatiske forhold såsom nedbør, nedbørsoverskud og nedbørsmønster og vind kan derfor betragtes som de drivende parametre for fosfortransporten fra landbrugsjord til vandmiljø. Det er derfor væsentligt at holde sig for øje, at eventuelle klimaændringer vil kunne påvirke fosfortabet fra landbrugsjord til vandmiljøet ganske betydeligt fremover. Går klimaændringerne, som man formoder i øjeblikket, i retning af mere og mere intens nedbør (Christensen & Christensen, 2003) vil risikoen for fosfortab øges væsentligt og det gælder vel at mærke alle de tabsprocesser, der har med vandbevægelse at gøre (brink- og overfladeerosion, overfladeafstrømning og nedvaskning). Eventuelle klimaændringers betydning for fosfortabet fra det dyrkede areal er nærmere beskrevet af Olesen et al. (2004).

Jordens evne til at binde fosfor og lede vand samt jordens struktur og terrænforhold er også blandt nøgleparametrene for fosfortransporten og for fordelingen af fosfor i jorden. Fordelingen af fosfor i jorden og tabet fra jorden påvirkes også af dyrkningsmæssige faktorer såsom plantevækst, gødskning og jordbearbejdning.

Fra NOVA har vi estimater for, hvor meget fosfor der transporteres i de undersøgte vandløb. Det målte fosfor stammer fra det naturlige baggrundsbidrag, eventuelle punktkilder, bidrag fra spredt bebyggelse og diffuse tab fra landbrugsarealerne, og vi kan med rimelig sikkerhed opsplitte det målte fosfortab på disse hovedkilder. Vi har derimod ikke den nødvendige viden til at kvantificere det fosfortab, der ville være i en såkaldt referencetilstand (som svarer til naturtilstanden), det ekstra fosfortab der måtte være opstået på grund af jordens opdyrkning (med deraf følgende ændringer i hydrologi og plantedække) og det yderligere tab, der er forbundet med ophobningen af gødningsfosfor i jorden.

Ligeledes har vi kun et yderst spinkelt grundlag for at splitte det diffuse tab fra landbruget op i bidrag fra forskellige tabsveje og forskellige områder i oplandet til vandløbet. Her er vores datagrundlag begrænset til få og isolerede undersøgelser, og disse undersøgelser er i de fleste tilfælde mindre egnede som grundlag for opskalering, bl.a. fordi det må forventes, at kilder og transportveje varierer meget fra opland til opland. Hertil kommer, at betydningen af kilder og transportveje formentlig ændrer sig ned gennem vandsystemerne. En anden væsentlig usikkerhed ved opgørelsen af fosfordraget fra landbrugsarealer i større vandsystemer er fosfortilbageholdelsen i vandløb, søer og ådale.

### **3.2 Fosforbinding og -frigivelse i jord**

*Gitte Holton Rubæk, Mogens Hummelkrog Greve og Bjarne Hansen*

Fosfor i jorden forekommer dels som uorganisk fosfor og dels som organisk bundet fosfor. I almindelig agerjord udgør organisk bundet fosfor omkring halvdelen (Borggaard et al., 1991). Planter optager primært uorganisk fosfor. Organisk fosfor er derfor som hovedregel ikke direkte plantetilgængeligt. Størstedelen af det uorganiske fosfor i jorden er bundet til jern- og aluminiumminerale, men også mere eller mindre tungt opløselige calciumfosfater forekommer. Fosfor reagerer villigt med jordens faste bestanddele, og kun en meget lille del af jordens uorganiske fosfor er opløst i jordvæsken og derved umiddelbart tilgængeligt for planterne og for udvaskning som opløst fosfor

med afstrømning fra rodzonen. Både organisk og uorganisk fosfor, bundet eller opløst kan som nævnt tabes fra jorden til vandmiljøet.

Jordens fosfor indeles ofte i puljer med tilgængelighed varierende fra helt utilgængelige til såkaldte let ombyttelige puljer, hvorfra fosfor relativt let kan frigøres til jordvæsken. Mellem puljerne og jordvæsken er der ligevægte. Fjernes fosfor fra jordvæsken ved, at planterne optager fosfor, eller ved udvaskning af fosfor fra rodzonen til dræn og grundvand, forskydes ligevægten, og der frigøres fosfor fra de bundne puljer i jorden. Tilføres letopløseligt fosfor, eksempelvis ved gødskning, vil der ske en forskydning i modsat retning, idet en del af det opløste fosfor vil bindes til jordens faste fase. Jordens bindingskapacitet for fosfor er generelt stor, men i teorien begrænset. Bindingskapaciteten kan variere ganske betydeligt for forskellige jordtyper og med jorddybden. Ved fortsat tilførsel beslaglægges en stadigt stigende del af jordens fosforbindingskapacitet, jordens fosformætningsgrad vil stige, og der vil efterhånden ske mærkbare stigninger i fosforkoncentrationen i jordvæsken. Begrebet fosformætningsgrad giver ofte anledning til misforståelser. Fuldstændig mætning med fosfor er mulig, men på højbundsjorde er det i praksis irrelevant, da den såkaldte kritisk høje mætningsgrad indtræder længe før fuldstændig mætning. *Denne kritiske fosformætningsgrad er defineret som der, hvor jorden er så mættet, at den understøtter en fosforkoncentration i jordvæsken, som er højere end ønskeligt, f.eks. i forhold til udvaskning til vandmiljøet.* I Holland har man anvendt koncentrationen 0,1 mg fosfor pr. liter, da man her vurderede denne koncentration som værende kritisk for vandkvaliteten (van der Zee et al., 1990a,b; Breeuwsma & Reijerink, 1992). Denne værdi kan dog ikke overføres til danske forhold, da det med indførelsen af vandrammedirektivet vil være nødvendigt med individuel fastsættelse af kritiske niveauer i forbindelse med fastsættelsen af referencetilstanden for danske søer. For både lavvandede og dybe søer vil der i de fleste tilfælde blive tale om fastsættelse af lavere kritiske indløbskoncentrationer til søerne end 100 µg fosfor pr. liter. Lokalt vil den kritiske grænse for indløbskoncentrationen afhænge af opholdstiden for vandet i den enkelte sø.

### **3.2.1 Egenskaber af betydning for fosforbinding og frigivelse**

Mange undersøgelser har vist, at jordens evne til at binde fosfor stiger i takt med stigende indhold af ler og med indholdet af jern- og aluminiumoxider (Munkholm & Sibbesen, 1997).

Lerindhold og indholdet af jern- og aluminiumoxider varierer fra område til område og med dybden, hvorfor jordens fosforbindingskapacitet varierer hermed. I mineraljorde findes hovedparten af jordens fosfor således bundet i lerfraktionen. I dyrkningslaget af landbrugsjord fra Foulum (9% ler), Ødum (11% ler) og Askov (9% ler) fandtes ca. 70% af total-fosforet i ler- og ca. 30% i siltfraktionen. Sandfraktionen indeholdt kun få procent af jordens totale fosforindhold (Sibbesen, 1995; Rubæk et al., 1999). I nogle situationer kan større partikler være belagt med jern- og aluminiumoxider, hvorved også sand kan opnå en større bindingskapacitet. Sådanne belægninger er hyppigst i underjorden. Type og størrelsesfordeling af lerminerallerne er af betydning for, hvor stort et overfladeareal, der findes på lerminerallerne og for hvor mange bindingssteder, der findes pr. overfladeenhed (Borggaard et al., 1991). Fosfor bindes dårligt på frit kalk, men kan udfælde som calciumfosfater, hvilket især kan have betydning i kalkrige C-horisonter (Borggaard et al., 1991). Men selv i jord med frit kalk vil jern- og aluminiumoxidgrupper på jordens overflader ofte være de vigtigste steder (sites) for fosforbinding (Schwertmann and Scheik, 1980; Parfitt, 1978). Under danske forhold an-



ses indholdet af jern- og aluminiumoxider at være af særlig betydning for bindingskapaciteten (Borggaard et al., 1990; Borggaard et al., 1991).

Generelt set svækkes fosfors binding til jordens overflader ved stigende pH. På dyrket jord kalker man ofte jorden med henblik på at hæve jordens pH og forbedre jordens frugtbarhed, og derved påvirkes teoretisk set både jordens fosforbindende egenskaber og jordens evne til at forsyne planterne med fosfor. Forsøg under mark- og laboratorieforhold, hvor kalkningens påvirkning af fosfortilgængelighed for afgrøderne er undersøgt, har dog givet umiddelbart modstridende resultater (Haynes, 1984). Resultater, fra et markforsøg over vekselvirkningen mellem fosforgødskning og kalkning på en sur grovsandet dansk jord ved St. Jyndeved, har vist, at regelmæssig kalkning af denne jord gennem mere end 50 år har påvirket pH og jordens fosforbindende egenskaber (lidt svagere binding i kalket jord) ned til ca. en meters dybde i forhold til en ukalket dyrket behandling (Rubæk et al., 1998). Denne grovsandede jord har meget ringe bindingskapacitet i pløjelaget, men generel stor bindingskapacitet i underjorden i kraft af et stort indhold af jern- og aluminiumoxidhydroxider i den såkaldte spodiske horisont (Borggaard et al., 1991).

Jorde med højt lerindhold har måske nok en høj bindingskapacitet, men det høje lerindhold befordrer også en mere struktureret jord, hvori makroporer kan dannes. Regnvand kan opløse fosfor og især i forbindelse med kraftig nedbør løsrive fosforrige partikler fra overjorden og transportere disse hurtigt ned gennem porerne. Herved undgås kontakt med underjorden og dens store bindingskapacitet og en del af fosforet vil ende i drænrør, og via disse blive transporteret ud til vandmiljøet (Heckrath et al., 2000). I Danmark er landbrugsområder med naturlig dårlig dræning oftest kunstigt dræned. Kunstig dræning ses typisk på morænejord, hvor også undergrunden er lerholdig, og i lavtliggende områder, der er blevet afvandet og indvundet som landbrugsjord.

Fosfor bindes og mineraliseres løbende i jordens organiske pulje som følge af den biologiske aktivitet i jorden. Alt andet lige vil indholdet af organisk bundet fosfor generelt være større i jorde med permanent bevoksning sammenlignet med tilsvarende jorde under omdrift (Rubæk, 1999). I de fleste danske agerjorde udgør organisk bundet fosfor en størrelsesmæssig stabil fraktion. Det skyldes formentlig, at jordene har været under omdrift i lang tid og er nået til en form for ligevægtssituation i dyrket tilstand. Derfor kan der generelt set kun forventes forskydninger i størrelsen af den organisk bundne fosforpulje i forbindelse med ”systemomlægninger” (omlægning til eller fra vedvarende bevoksning f.eks. vedvarende græs eller skov). At den organiske puljes størrelse er nogenlunde stabil betyder dog ikke, at puljen er inaktiv, for organisk fosfor bliver løbende mineraliseret og gendannet i takt med den biologiske aktivitet i jorden (Oehl et al., 2001a,b). Denne løbende mineralisering (frigivelse) og immobilisering påvirker formentlig også potentialet for fosfortab væsentligt, og det kan specielt være vigtigt i områder med højt indhold af organisk materiale og stor mikrobiologisk aktivitet f.eks. i vandløbsnære arealer med vedvarende græs. Emnet er dog forskningsmæssigt meget dårligt belyst nationalt såvel som internationalt.

Fosforbinding og -frigivelse i organogene jorde adskiller sig fra de mineralske jorde, idet jordene har en lav bindingskapacitet, og at fosfor altovervejende er bundet på organisk form. I disse jorde har omsætningen af det organiske materiale derfor en relativt større betydning for fosfordynamik-

ken i jorden. Dannelse af sådanne jorde sker under vandlidende forhold. Anvendes jordene til dyrkning forudsætter det afvanding og hermed initieres en sætning af jorden, som også medfører frigivelse af det organisk bundne fosfor. Generelt er bindingskapaciteten for uorganisk fosfor meget lav i sådanne jorde sammenlignet med mineralske jorde. Under særlige forhold kan jern- og aluminiumforbindelser også i disse jorde spille en væsentlig rolle for fosforbinding og frigivelse. Dette er tilfældet ved afvanding af tidligere pyritholdige jorde, hvor ferro-jern ( $\text{Fe}^{2+}$ ) i jorden oxideres til ferrijern ( $\text{Fe}^{3+}$ ), som kan binde store mængder fosfor. Dyrkning af sådanne jorde kræver derfor tilførsel af store mængder fosforgødning. Fosfor, der er bundet til jernforbindelser i jorden, kan frigives igen, hvis ferriforbindelserne ( $\text{Fe}^{3+}$ ) reduceres til det langt mere opløselige ferro-jern ( $\text{Fe}^{2+}$ ), hvorved også det jernbunde fosfor frigives til jordvæsken. Dette kan ske, hvis vandstanden hæves igen, f.eks. i forbindelse med etablering af vådområder. Reducerende forhold kan også opstå ved vandmættethed i andre jorde, f.eks. i forbindelse med temporære høje grundvandsspejl. Temporær høj grundvandsstand ses ofte i lavtliggende områder omkring vandløbene. Vandmættethed kan også opstå meget lokalt i områder med dårlige afdræningsforhold.

Der findes enkelte danske laboratorieundersøgelser (Lind et al., 1996; Szilas et al., 1998; Jensen et al., 1999; upublicerede undersøgelser ved DJF/Syddansk Universitet), der demonstrerer potentialet for frigivelse af fosfor under reducerende forhold i udvalgte jorde, men vi kender ikke processens omfang og udbredelse under naturlige forhold. Også her vil vandbevægelsen i jorden være en altafgørende faktor for, hvor meget fosfor der rent faktisk tabes i sådanne situationer (Hoffman et al., 2003). De specielle forhold for fosforomsætning, -binding og -frigivelse fra den meget uhomogene gruppe af såkaldte lavbunds-jorde er generelt sparsomt belyst på trods af arealernes nærhed til vandmiljøet og mulige store potentiale for fosfortab.

### **3.2.2 Brug af generelle egenskaber til beskrivelse af fosforbinding og nedvaskningsforhold i danske jorde**

Ved vurdering af en jords evne til at binde og frigive fosfor er det nødvendigt at tage hele jordprofilen i betragtning, og den traditionelle inddeling af danske jorde efter tekstur eller endnu grovere i sandede og lerede jorde er helt utilstrækkelig (Borggaard et al., 1991). De generelle egenskaber ved danske jorde (delt op i iboende og landskabsrelaterede egenskaber), som må anses for væsentlige for danske jordes evne til at binde og frigive fosfor og risikoen for fosfortab via nedvaskning til dræn og grundvand, er følgende:

*Jordens iboende egenskaber:*

- Indhold af jern- og aluminiumoxider (fosforbindingskapacitet)
- Kalkholdige horisonter
- pH
- Kulstofindhold (organogen/ikke organogen, struktur, dybde af A-horizont)
- Naturlig dræningstilstand, (erodibilitet, potentiale for redox-mobilisering af fosfor)
- Tekstur (fosforbindingskapacitet, struktur og dermed muligheden for makroporestrømning)
- Lagdeling (abrupte skift i evne til at lede vand og binde fosfor, strømningsforhold i jordprofilet)

### *Landskabsrelaterede egenskaber*

- Højde af grundvandsspejl (nærhed til grundvand, risiko for vandmætning og redox-mobilisering af fosfor)
- Terrænhældning (vandbevægelse)
- Kunstig dræning (risiko for fosfortab via dræn)

I Danmark findes der flere landsdækkende databaser, som siger noget om jorden i rodzonen på regional skala. Geografisk opskalering på regional skala af disse vil på forskellig vis kunne indgå i en karakterisering af jordens egenskaber til fosforbinding og risiko for fosfortab via nedvaskningsprocesser. Regional opskalering på basis af generelle egenskaber forudsætter, at man kan sammenstille viden om generelle jordbundsegenskaber (pedotransferfunktioner) til også at udtrykke mere specielle egenskaber som f.eks. fosforbindingskapacitet. Sådanne pedotransferfunktioner vedrørende fosforbindingskapacitet og risiko for nedvaskning er p.t. ikke anvendt i Danmark eller andre EU lande i større skala. Pedotransferfunktionerne vil i sagens natur være generaliserende og derfor behæftet med usikkerheder. Samtidig begrænses detaljeringsgraden i de opskalerede output naturligvis af den detaljeringsgrad, der findes i databaserne med generelle informationer. Ikke desto mindre ville man formentlig kunne opnå et overblik over danske jordens egenskaber mht. fosforbinding med denne fremgangsmåde. En væsentlig forudsætning for sådanne screeninger er, at der udvikles pedotransferfunktioner specielt til dette formål, og præcision og kompleksitet af sådanne funktioner er ikke kendte p.t. De principper, der kunne anvendes ved kortlægning af henholdsvis fosforbindingsegenskaber og nedvaskningsbetingelser, er skitseret herunder.

### **3.2.3 Principper for regional kortlægning af jordens fosforbindende egenskaber**

Følgende datasæt vil kunne anvendes:

- Geologisk jordartskort (GJA) (1:25 000 (80% af DK), i resten af DK anvendes 1:200 000).
- Den Danske Jordprofil Database (DDJD) (ca. 2000 jordprofiler beskrevet og analyseret).
- Jordklassificeringen (JB) (Ca. 40.000 prøver af topjord karakteriseret mht. tekstur).
- Et temakort, der angiver lavbundsarealer.

Der foretages en opdeling af Danmark i geologiske regioner. Punktdata fra Den Danske profildatabase (DDJD) og jordbundsklassificeringen (JB) kobles mod det arealdækkende geologiske jordartskort (GJA), dvs. alle punkter i de to databaser inden for f.eks. moræneler i Nordjylland anvendes til udregning af aktuelle parametre. På denne måde anvendes GJA som opskaleringstema.

For topjorden, inden for hver af de geologiske regioner, laves der en statistisk behandling af data med middelværdi og spredning etc. for de relevante parametre for hver af farvekoderne i JB ved hjælp af tekstur punktdata fra JB databasen og en form for pedotransfer funktion, der omsætter viden om generelle egenskaber til karakterisering af jordens evne til at binde fosfor. Tilsvarende for underjorden laves der, inden for hver af de geologiske regioner, en statistisk behandling af data med middelværdi og spredning etc. for de relevante parametre for hver af de geologiske jordarter f.eks. moræneler ved hjælp af tekstur punktdata fra JB databasen og en pedotransfer funktion, der omsætter generelle egenskaber til et udtryk for underjordens evne til at binde fosfor.

På denne måde får hver enkelt polygon på GJA i alle geologiske regioner en parameterværdi, der udtrykker fosforbindende egenskaber i henholdsvis top- og underjord samt et udtryk for usikkerheden ved denne parameter (spredning).

I tabel 3.1 skitseres for to georegioner i Danmark de generelle iboende egenskaber ved typiske jorde, som anses for væsentlige for fosforbindende egenskaber og vandbevægelse, og som evt. vil kunne indgå som parametre i de pedotransferfunktioner, der skal udvikles i forbindelse med de skitserede kortlægningsprincipper.

**Tabel 3.1 Oversigt over jordens iboende egenskaber, der anses for væsentlige med hensyn til fosforbinding og vandbevægelse i jorden skitseret for de dominerende jordtyper i de to georegioner i Danmark. Fra de pedologiske grupper hentes information om f.eks. indhold af jern- og aluminiumoxider**

Georegion	Dominerende jordart	Dominerende jordtype i topjorden	Væsentlige iboende egenskaber mht. fosforbinding og vandbevægelse i underjorden
Øst	Moræneler	Lerblandet sandjord, sandblandet lerjord og lerjord	Struktureret underjord Kalk i C-horisont Pedologi: Lessive, Cambisol på Sydsjælland
	Dilluvialsand	Lerblandet sandjord	Lagdelt underjord, grovsand/mellemsand/grus Lav pH i underjord Pedologi: Brunsol, Podsol
	Ekstramarginal smeltvandssand	Grovsandet jord	Lagdelt underjord, grovsand/mellemsand/grus Lav pH i underjord Pedologi: Brunsol, Podsol
	Morænesand	Lerblandet sandjord	Ustruktureret underjord, lerblandet underjord Lav pH i C-horisont Pedologi: Brunsol, Arenosol
Vest	Moræneler	Finsandet jord, lerblandet sandjord, sandblandet lerjord	Struktureret underjord Lav pH i underjord Pedologi: Lessive jord
	Morænesand	Lerblandet sandjord	Ustruktureret underjord, lerblandet underjord, ofte meget kompakt. Lav pH i underjord Pedologi: Podsol, Brunsol
	Dilluvialsand	Lerblandet sandjord,	Lagdelt underjord, grovsand/mellemsand/grus Lav pH i underjord Pedologi: Podsol
	Ekstramarginal smeltvandssand	Grovsandet jord	Lagdelt underjord, grovsand/mellemsand/grus Lav pH i underjord Pedologi: Podsol
	Flyvesand	Grovsandet jord	Tekstur meget ensartet grovsand i hele profilet Lav pH i underjord Pedologi: Blegsol, Podsol
	Yoldiasand	Finsandet jord	Ensartet sand Lav pH i underjord Pedologi: Brunsol, Podsol
	Littorinasand	Finsandet jord	Ofte lagdelt sand fin/mellem Høj pH i underjord, høj grundvandstand Pedologi: Gleysol

### 3.2.4 Principper for regional kortlægning af behov for kunstig dræning

Fosfortab ved nedvaskning i højbundsområder er afhængig af vandbevægelsen i jorden og dermed af faktorer som nedsivning, grundvandsdannelse og behov for kunstig dræning. I sandjordsområder er der som regel gode muligheder for nedsivning og sjældent behov for kunstig dræning, hvis ikke

der er lerlag i en begrænset dybde eller højtstående grundvandsstand. I lerjordsområder afhænger grundvandsdannelse og behov for kunstig dræning bl.a. af geologisk oprindelse, jordens lerindhold og den opsprækning af de øvre jordlag, der er sket siden den geologiske dannelse. Opsprækningen skyldes dels pedologiske processer som kalkudvaskning og udtørring/opfugtning i A- og B-horisonter, dels hydrogeologiske og geokemiske processer i undergrunden (C-horisonten). Som resultatet af processerne ses ofte, at jordens hydrauliske ledningsevne aftager med dybden, hvor den er høj i A- og B-horisonter (vækstlaget), falder drastisk omkring kalkudvaskningsgrænsen, og er meget lav i dybder med lav redox-potentiale. Det kan indebære, at der i forbindelse med overskuds- nedbør, primært i vinterhalvåret, sker opbygning af temporært (frit) grundvand enten i vækstlaget eller dybere i jordprofilen over grundvandspejlet. Dræning af lerarealer på højbund har således til formål at forhindre, at der opbygges et planteskadeligt temporært grundvandspejl over drændybde, dvs. afledning af vand, der stuver op i vækstlaget. Dræning reducerer desuden risikoen for overfladisk afstrømning og deraf følgende erosion.

Kunstig dræning er en indikator for, at der periodevis sker vandstuvning med mulighed for præferentiel strømning med risiko for nedvaskning af bl.a. fosfor. Kunstig dræning er samtidigt en væsentlig parameter i alle vandtransport- og vandbalancebetragtninger på lerjord. Mellem 70 og 80% af de danske lerjorde er systematisk drænet med rørdræn i ca. 1 meters dybde. Afstrømningen i kunstige dræn svinger normalt mellem 50 og 90% af overskudsnedbøren, resten danner grundvand. Desværre findes der kun i meget begrænset omfang oplysninger om drænedede arealer på digital eller anden let tilgængelig form.

Vandstuvning i den umættede zone over grundvandspejlet kan medføre anaerobe forhold og dermed en potentiel mobilisering af opløst fosfor. Vandstuvningen i topjorden er samtidig en af forudsætningerne for, at der kan ske præferentiel strømning med risiko for udvaskning af både partikelbundet og opløst fosfor. Der er derfor behov for at kunne underindele lerede landskabselementer i områder med ringe naturlig dræning (lille grundvandsdannelse og stort afvandingsbehov) og områder med god naturlig dræning (stor nedsvivning og lille afvandingsbehov).

Dansk Jordklassificering (DJF) (Arealdatakontoret, 1985) har tidligere udviklet en metode til udpegning af områder med større eller mindre afvandingsbehov. Den er baseret på landskabselementer, kvartærgeologiske kort over sandet/leret undergrund (GEUS) og farvekoder i DJF, dvs. jordtype i pløjelaget. På kommuneniveau blev der beregnet areal, fordelt på afvandingsklasse 1 til 4, hvor afvandingsklasse 1 omfattede lavbundslande samt områder med 75 - 100% behov for afvanding. Afvandingsklasse 4 havde tilsvarende et afvandingsbehov på 0 - 25% af arealet.

Siden denne kortlægning blev gennemført, er flere data blevet tilgængelige på digital form, og der er udviklet bedre Geografisk Informations System (GIS) værktøjer. Ovennævnte metode har den svaghed, at de anvendte geologiske oplysninger kun forelå på digital form i stor skala. Der foreligger nu digitale geologiske kort i skala 1:25.000 for ca. 80% af landet (Hermansen & Jakobsen, 2000) og hele landet i skala 1:200.000 (Hermansen et al., 1999). Boringsdatabasen Jupiter (GEUS) indeholder data om tykkelse af lerlag, mægtigheden af den kalkfrie zone og skiftet fra iltede til ikke iltede jordarter. Desuden foreligger flere georelaterede oplysninger om drænedede arealer indsamlet

ved interviewundersøgelser udført af Hedeselskabet 1983-89 (Kelstrup & Hansen, 1986; Hansen, 1990). Fra disse undersøgelser foreligger oplysninger om bl.a. arealanvendelse og dræning på markniveau for 17 oplande svarende til ca. 1300 marker. Den geografiske placering af arealerne, og detaljeringsgraden er væsentlig bedre end i tidligere gennemførte undersøgelser af dræningens omfang.

På grundlag af det forbedrede datamateriale er der udarbejdet en forbedret model til kortlægning af det tekstur- og strukturbetingede afvandingsbehov. I modellen indgår geologi, landskabslementer og farvekode. Den vigtigste parameter er som ventet oplysninger fra geologiske kort, men landskabslementer er også en vigtig parameter i modellen. Der er således fundet et overraskende stort dræningsbehov for landskabslementet 'bakkeø', hvor undergrunden ifølge de geologiske kort er gruset eller sandet. Det skyldes antageligt, at der på bakkeøer ofte i begrænset dybde er ler overlejret af grus eller sand. Dræningsbehovet skyldes i disse tilfælde de underliggende lerlag.

Resultaterne viser, at der er mulighed for at estimere drænbehov og muligheder for nedsivning med god sikkerhed for områder, hvor geologiske kort 1:25.000 foreligger og med nogen større usikkerhed, hvor de geologiske oplysninger stammer fra kort i 1:200.000 (Hansen & Olesen, 2005).

Der er også mulighed for at anvende historiske kort til udpegning af arealer med manglende nedsivning af overskudsnedbør. Først og fremmest kan 1844 matriklen anvendes, da den rummer mulighed for udpegning af sidbundsarealer, før den intensive dræning gennemførtes fra midten af 1800-tallet.

### **3.2.5 Muligheder for kortlægning af markvariation (EM38)**

Gennem de seneste år er der udviklet en hurtig geofysisk metode til detaljeret jordbundskortlægning på markniveau. Ved hjælp af sensoren EM38 måles den gennemsnitlige elektromagnetiske ledningsevne i jorden, ned til ca. 1,5 meter. Den elektromagnetiske ledningsevne er en funktion af indholdet af salte i jordvæsken, type og indhold af lerminerale (< 2 $\mu$ m) og vandindholdet. Under danske forhold uden saltakkumulering i jorden og ved lille indhold af organisk stof i jorden kan resultaterne tolkes således, at høje værdier er ensbetydende med et stort indhold af lerholdige sedimenter, og at lave værdier er præget af mere sandholdige sedimenter. Målingerne er således under danske forhold stærkt korreleret til jordens lerindhold.

Kortlægning i felten foretages ved, at en kunststofslæde, hvorpå EM 38 sensoren er monteret sammen med en GPS-antenne (Global Positioning System), slæbes gennem terrænet af en firehjulstrukket motorcykel, hvorpå der er monteret en GPS modtager og en datalogger. Hvert sekund foretages der automatisk en EM 38- og en GPS-måling. Der køres i parallelle linier med ca. 20 meters afstand. Hvis der er afgrøder på arealet anvendes så vidt muligt eksisterende kørespor. Arealet dækkes således med målinger for ca. hver 10 - 20 meter, og en kortlægning af marken er baseret på langt flere målinger end ved den traditionelle metode.

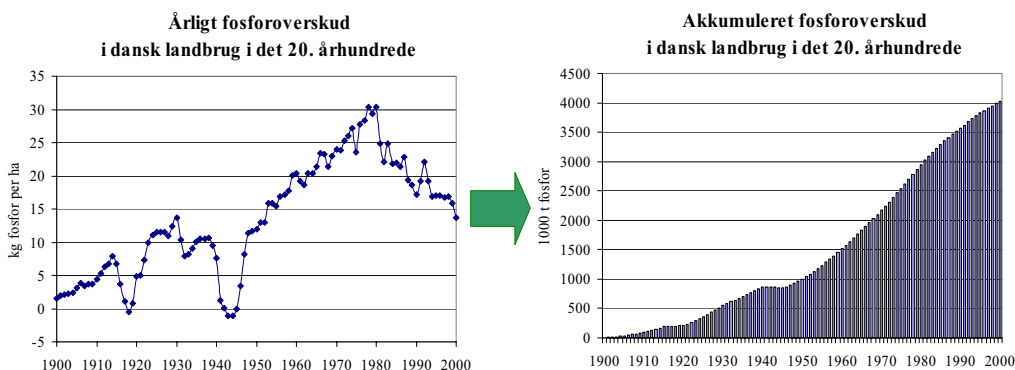
Det er vigtigt at være opmærksom på, at EM38-målinger er relative og skal suppleres med jordboringer for at kunne vise jordbundens sammensætning i de forskellige områder. EM38 målinger kan

således ikke stå alene ved en jordbundskortlægning med henblik på vurderinger af bindingsforhold for fosfor. Dertil kræves yderligere en jordtypebestemmelse ved hjælp af pedologisk undersøgelse og jordbundsanalyser. Men metoden vil eventuelt kunne anvendes ved detaljerede undersøgelser af risikoområder, ved fremtidig risikovurdering på mark eller delmarkniveau (se også afsnit 3.8).

### 3.3 Fosfortilførsel, -ophobning og -mætningsgrad i danske landbrugsjorde

*Tommy Dalgaard og Gitte Holton Rubæk*

Tabet af fosfor fra landbrugsjord er lille i forhold til de mængder af fosfor, der findes i jorden, og i forhold til de årlige tilførsler med gødning og bortførsler med afgrøderne. Tilføres der mere fosfor, end der fraføres, sker der derfor en ophobning af fosfor i jorden. Siden anden verdenskrig er der sket en markant ophobning af fosfor i dansk landbrugsjord. Omfanget af den summerede ophobning (figur 3.4) over en længere årrække kan estimeres på nationalt niveau ud fra kendskab til import af fosfor i mineraliske gødninger og foderstoffer og eksport med landbrugsprodukter (figur 1.2 og 1.3).



**Figur 3.4** Årligt og akkumuleret fosforoverskud i dansk landbrug i det 20. århundrede. Det årlige fosforoverskud har siden 1980 været faldende og stigningen i det akkumulerede fosforoverskud er derfor aftaget. Fosforoverskuddet før år 1900, som ikke er vist på figuren, var ubetydeligt i forhold til de seneste 100 års overskud (efter Dalgaard & Kyllingsbæk, 2005).

Specielt i den første halvdel af det 20. århundrede var overskudstildelingen af fosfor begrundet ud fra et planteernæringsmæssigt synspunkt. Således var omkring halvdelen af de fosforsyretil, der blev analyseret i Jylland i 1950, under det anbefalede niveau (figur 3.5).

I dag ligger mere end halvdelen af fosfortalsanalyserne imidlertid over det anbefalede niveau (figur 3.5 nederst). Det betyder, at der omkring år 1950 stadig var behov for at øge fosforindholdet på store dele af landbrugsjorden, mens der, ud fra en planteernæringsmæssig synsvinkel, i dag mange steder vil kunne tæres på jordens fosforpulje uden udbyttmæssige konsekvenser.

Figur 3.4 viser det årlige fosforoverskud i det 20. århundrede. Summeret over de 100 år er overskuddet på ca. 4.000.000 t fosfor, svarende til ca. 1,4 t fosfor pr. ha landbrugsjord (ekskl. brak). Til sammenligning viser opgørelser fra KVADRATNETTET (Rubæk et al., 2000), at landbrugsjordene i

Danmark i gennemsnit indeholder ca. 4,6 t total-fosfor pr. ha, mens løvskovsjerne, som må antages at have været uden for landbrugsmæssig drift, indeholder ca. 2,7 t total-fosfor pr. ha indtil 75 cm dybde (under 75 cm dybde var der ikke forskel på fosforindholdet i landbrugs- og løvskovsjerne). Dvs. forskellen i fosforindhold, som er et udtryk for den landbrugsbetingede ophobning i jorden gennem tiden, er ca. 1,9 t total-fosfor pr. ha. Sammenlignes denne talstørrelse med det summerede fosforoverskud fra dansk landbrug i det 20. århundrede på 1,4 t fosfor pr. ha, som må antages i overvejende grad at være ophobet i landbrugsjorden, ses, at denne ophobning svarer til ca. 75% af forskellen i fosforindhold i de undersøgte jorde med og uden landbrugsdrift. Taget usikkerhederne i betragtning må de to tal siges at være i samme størrelsesorden. De resterende ca. 25% kan bl.a. skyldes naturbetingede forskelle i jordens fosforindhold på de arealer, der er opdyrket til landbrug, og de arealer, der gennem mange år har været dækket af løvskov, eller at der gennem tiden måske har været en større udpining af løvskovs- end af landbrugsjordenes naturlige fosforindhold. Derimod har det nationale fosforoverskud før år 1900 antageligt været ubetydeligt. Ja, der kan endog have været tale om et beskedent fosforunderskud, idet eksporten af fosfor i fødevarer har været større end importen af fosfor, der stort set var lig nul før den begyndende import af fosforgødninger i årtierne op mod år 1900.

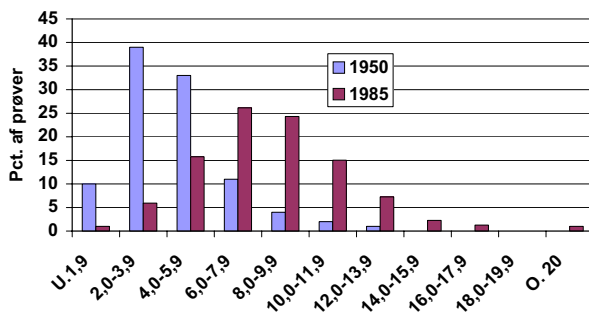
I tiden før år 1900 er der sket en omfordeling af fosfor mellem indmark og udmark, som lokalt kan være af stor betydning for jordens fosforindhold. Tilsvarende er der op gennem det 20. århundrede foregået en stadig større omfordeling, hvor fosfor i form af foder, fødevarer og husdyrgødning flyttes ikke bare mellem indmark og udmark, men også mellem bedrifter og mellem landsdele. Denne skæve fordeling fremgår ikke af figur 3.4, men diskuteres nærmere i det kommende afsnit 3.3.1.

Det er interessant, at ca. 3/4 af den landbrugsbetingede fosforophobning, ifølge ovenstående betragtninger, er foregået inden for de seneste 50 år og ca. 1/3 inden for det seneste kvarte århundrede. Siden 1980 er det årlige fosforoverskud imidlertid halveret, svarende til en nedgang i det årlige fosforoverskud på ca. 16 kg fosfor pr. ha (figur 3.4). Dette er en bemærkelsesværdig reduktion, som dog kun svarer til ca. 1% af det samlede fosforoverskud gennem de seneste 100 år (1,4 ton pr. ha).

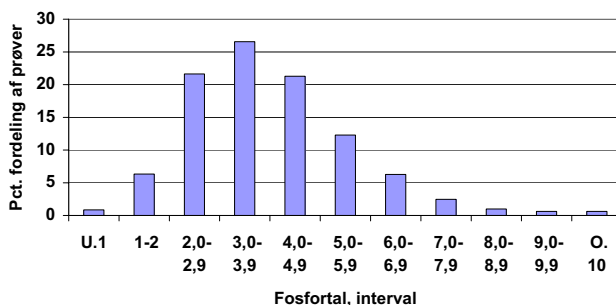
Fælles for ovenstående betragtninger er, at de er landsgennemsnit. Afvigelserne i forhold til landsgennemsnittet ville være store, hvis tilsvarende opgørelser kunne foretages for forskellige områder med forskellige former for landbrugsdrift. Kendskabet til denne regionale fordeling af fosforophobningen er væsentlig for vurderingen af risiko for fosfortab, og vil være genstand for en nærmere analyse i det kommende afsnit.



Fosforsyretil i DK, 1950 og 1985



Fosfortal i Danmark



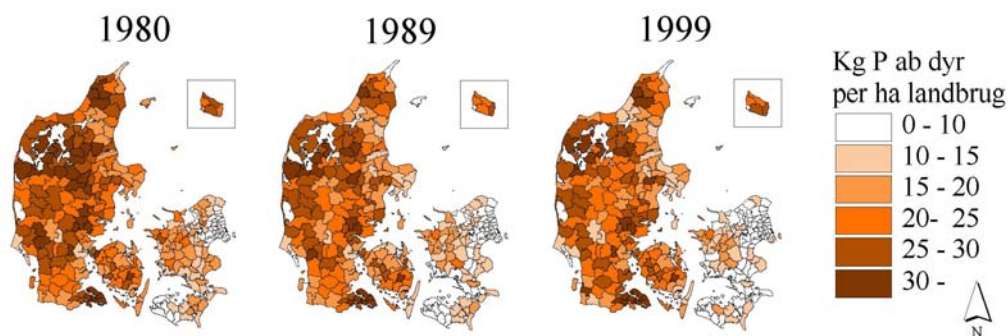
Figur 3.5 Øverst: Udviklingen i fordeling af fosforsyretil fra 1950 til 1985. Fosforsyretillet blev anvendt til vurdering af jordens fosforstatus mht. plantetilgængelighed indtil 1987. Fosforsyretil mindre end 5 ansås for lave, fosforsyretil mellem 5 og 8 var passende, og tal over 8 blev anset for høje. Fra 1987 og fremefter har man anvendt fosfortallet. Groft inddelt anses fosfortal mindre end 2 for lave, mellem 2 og 4 passende og over 4 for høje. Nederste figur viser fordelingen af fosfortal i 1999 (efter Knudsen, 2000). Data for disse figurer stammer fra landmændenes jordbundsanalyser de pågældende år. Repræsentativiteten har formentlig ændret sig gennem tiden, da der generelt analyseres langt færre jordprøver i dag, end der gjorde før i tiden.

### 3.3.1 Kortlægning af aktuel og historisk tilførsel af fosfor med husdyrgødning

Den geografiske fordeling af tilførslen af fosfor med husdyrgødning har ændret sig i tidens løb i takt med landbrugets udvikling og strukturændringer. Siden opdyrkningen af landbrugsjordene og frem til sidste halvdel af 1800-tallet gødede man udelukkende med fosfor i organiske gødninger, og herunder i enkelte beskrevne tilfælde med ben, guano og andre ikke industrielt fremstillede fosforkilder. I efterkrigstiden opgødskede man bevidst landbrugsjorden med fosfor i handelsgødning, fordi der var store udbyttegevinster ved at have en jord med tilstrækkelig god fosforstatus. I dag sker ophobningen især i egne med stor husdyrtæthed som følge af ubalancen mellem indholdet af kvælstof og fosfor i husdyrgødningen, når denne anvendes til fuldgydning med kvælstof i planteproduktionen. Spredning af husdyrgødning sker ofte så nær som muligt, hvor husdyrene befinder

sig, da det er omkostningstungt og besværligt at transportere gødningen langt. Derfor fuldgødes marker nær staldene oftere med husdyrgødning end marker længere væk, og har gennem tiderne fået en større andel fosfor end de øvrige marker. Gårdenes og dermed staldenes placering har også flyttet sig gennem årene og i takt med sammenlægninger til større enheder.

I det følgende anvendes produktionen af fosfor i husdyrgødning som en indikator for områder, hvor der er sket den største fosforophobning. På baggrund af specialudtræk fra Danmarks Statistik og normer for fosforudskillelsen fra de vigtigste husdyr (Poulsen & Børsting, 2002) er fosformængden ab dyr således beregnet pr. dyrket landbrugsareal i de danske kommuner 1980, 1989 og 1999 (figur 3.6, tabel 3.2). For yderligere oplysninger omkring antagelserne bag opgørelserne henvises til kapitlet vedrørende husdyr og fosfor.



**Figur 3.6 Den geografiske fordeling af fosfor fra husdyr i Danmark, illustreret ved kg totalfosfor ab dyr pr. ha dyrket areal i de danske kommuner 1980, 1989 og 1999 (efter Dalgaard & Olsen, 2002).**

Opgørelserne viser, at områderne med den største produktion af husdyrgødning er skrumpet ind i perioden fra 1980 - 1999 (tabel 3.2), hvilket er i overensstemmelse med det konstaterede generelle fald i det årlige nationale fosforoverskud (figur 3.4). Kortlægningen viser desuden, at de områder, hvor der i dag sker den største produktion af husdyrgødningsfosfor, også er de områder, hvor der skete den største produktion i 1980 og 1989. Samtidig viser tilsvarende opgørelser tilbage i tid, at det samme billede gjorde sig gældende i begyndelsen- og i midten af 1900-tallet (Dalgaard & Kyllingsbæk, 2005). Der har således gennem hele århundredet været en koncentreret af husdyrholdet i særligt husdyrintensive områder i Jylland og på Fyn, mens husdyrholdet og dermed antageligt også ophobningen af fosfor er aftagende i de øvrige landsdele. Denne heterogene fordeling af husdyrgødningsfosfor og den fortsatte strukturudvikling hen imod en mere geografisk koncentreret husdyrproduktion har givetvis konsekvenser for fosfortabet til miljøet og kan sikkert med fordel anvendes til at målrette de virkemidler til reduktion af fosfortabet, som gennemgås senere i denne rapport. For en nærmere gennemgang af muligheder for konsekvensanalyser af sådanne målrettede kontra generelle virkemidler henvises til Rygnestad et al. (2000).

**Tabel 3.2 Procent af landbrugsarealet i kommunerne fordelt på syv klasser mht. kg fosfor ab dyr pr. ha landbrugsjord (samme data som ligger bag figur 3.6)**

	Kg P ab dyr pr. ha landbrugsjord						
	0-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-43
1980	4%	6%	22%	24%	24%	17%	3%
1989	7%	11%	25%	21%	25%	8%	2%
1999	10%	13%	18%	24%	23%	8%	2%

Som nævnt viser opgørelserne bag figur 3.6, at det gennemsnitlige fosforoverskud i Danmark er halveret i perioden 1980-2000. Opgørelser efter Sibbesens (1990) princip viser imidlertid, at fosformængden i husdyrgødningen har været nogenlunde konstant i samme periode, mens fosfor tilført med handelsgødning udviste et fald i samme størrelsesorden som faldet i fosforoverskuddet. Fosfor i husdyrgødning er en væsentlig faktor ved kortlægning af områder med stor fosforophobning, men værdien af kortlægningen vil kunne forbedres med analyser af, hvordan handelsgødning er blevet fordelt.

I disse år forskes intensivt i, hvorledes data fra de generelle landbrugsregistre i kombination med modelberegninger og geografiske informationssystemer kan anvendes til en forbedret kortlægning og mere detaljeret identifikation af områder med stor fosforophobning og stor risiko for fosfortab. Målet er at udarbejde kort og opgørelser, som bl.a. kan anvendes ved indsatsplanlægning i specifikke vandoplande. I den forbindelse vil det være formålstjenligt gennem en bedriftsmodellering at kunne udarbejde egentlige fosforbalancer på mark- og bedriftsniveau, og i kombination med oplysninger om bl.a. arealanvendelse, topografi og historisk landbrugsdrift at kunne konsekvensvurdere og prioritere virkemidler til at forbedre fosforudnyttelsen i landbruget og begrænse tabet.

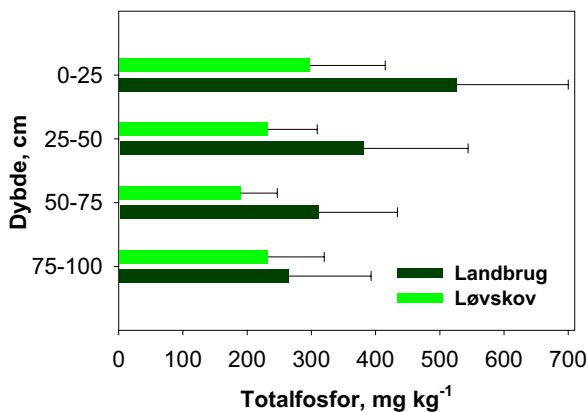
### 3.3.2 Faktiske målinger af jordens fosforstatus

Da fosforophobningen har fundet sted over lang tid, med forskellige årsager, og løbende har ændret profil i takt med strukturændringerne i landbruget, er det meget vanskeligt at redegøre for fosforophobningen på den enkelte mark ud fra registerdata og statistiske oplysninger om regionen og landbrugsdriften gennem tiderne. Kendskab til den samlede historiske fosforophobning på markniveau forudsætter kendskab til tilførsler af både husdyr- og handelsgødning og til bortførslerne med afgrøderne langt tilbage i tiden. For at opnå operationel viden om fosforophobningen og den resulterende fosformætningsgrad – i forbindelse med udpegning af risikoarealer for fosfortab på mark eller delmarkniveau – er det derfor nødvendigt at have kendskab til markens fosforindhold. Så detaljerede oplysninger kan i praksis kun opnås med tilstrækkelig sikkerhed ved en måling af jordens fosfor. Har man en faktisk måling og oplysninger om til- og fraførsler af fosfor efter målingen, vil udviklingen i fosforparametrene kunne estimeres ud fra målingen og registerdata i en årrække fremover.

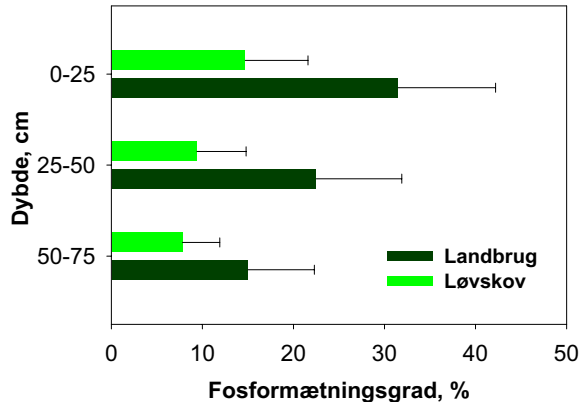
Nedennævnte større datasæt med faktiske målinger af fosforindhold, -ophobning, mætningsgrad eller plantetilgængelighed i danske jorde sat i relation til geografi, region, jordtyper eller lignende er væsentlige for vores viden om danske jordes fosfortilstand:

### Fosformålinger i KVADRATNETTET i 1986 og 1997

KVADRATNETTET, som drives af Dansk Landbrug, Landscentret, Planteavl, blev etableret i 1986 til bestemmelse af jordens indhold af uorganisk kvælstof, og siden er der årligt udtaget prøver fra landbrugsarealerne. KVADRATNETTET består af ca. 830 fastliggende måleflader på 50 x 50 m systematisk fordelt over hele landet med en gridafstand på 7 km. 590 af fladerne findes på landbrugsarealer. For hver måleflade kendes arealanvendelsen, og for landbrugsfladerne registreres diverse dyrkningsmæssige parametre årligt i en database. Jordprøver fra fladerne er udtaget som blandingsprøver for hver 25 cm indtil 1 meters dybde. I 1998 - 2000 blev udvalgte arkiverede jordprøver fra 1986 og 1997 analyseret for fosforindhold og fosformætningsgrad (Rubæk et al., 2000; 2001). Da de samme punkter er analyseret med 11 års mellemrum, er det muligt at analysere ændringer i fosforstatus i denne 11 års periode og relatere disse til de registrerede oplysninger om bedrift og dyrkning i perioden. Herved har datasættet givet værdifuld indsigt i den faktiske fosforstatus i dyrkede danske jorde, og denne status er også blevet relateret til fosforstatus i 32 måleflader fra løvskovsjord (figur 3.7 og 3.8). Af figurene ses, at både indholdet af total-fosfor og fosformætningsgraden er større på landbrugsjordene end i løvskovsjordene ned til 75 cm dybde.

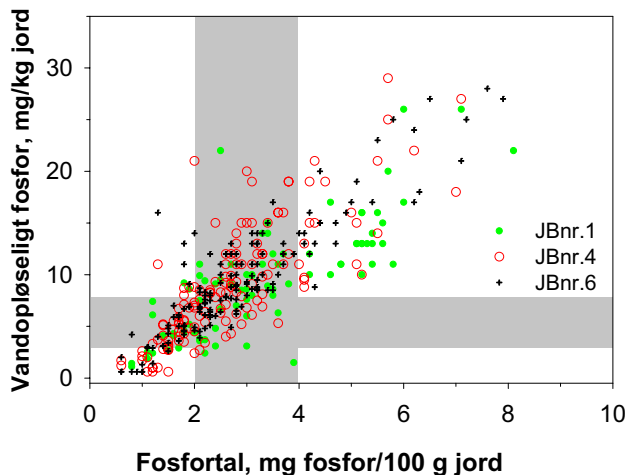


**Figur 3.7** Fosforindholdet i landbrugs- og løvskovsjorde ned til 1 m dybde ifølge undersøgelser på kvadratnetpunkter (Rubæk et al., 2001). Data fra løvskov er fra 1986. Data fra landbrug i 0-50 cm er fra 1986 og i 50-100 cm fra 1997.

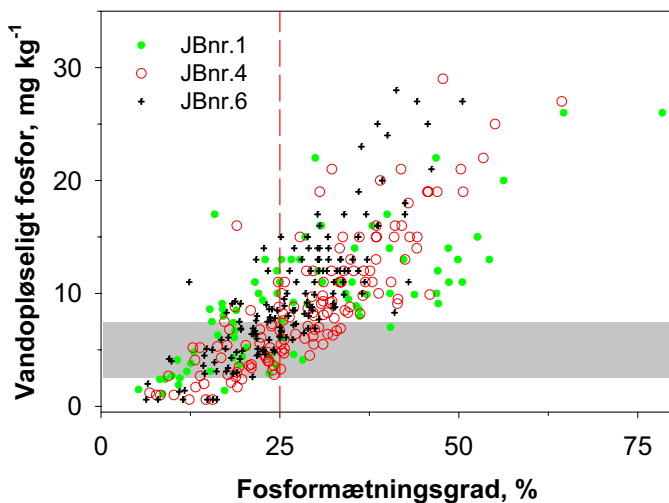


**Figur 3.8** Fosformætningsgraden bestemt ved oxalatekstraktion i landbrugs- og løvskovsJORDE ned til 75 cm dybde ifølge undersøgelser på kvadratnettpunkter (Rubæk et al., 2001). Data fra landbrugsjorde er fra 1997. Data fra løvskov er fra 1986.

I undersøgelsen indgik også ekstraktion af jordprøverne med vand. Denne ekstraktion kan bruges som en indikation for, hvor meget fosfor jorden kan frigive til jordvandet. Figur 3.9 og figur 3.10 viser, at der er en tydelig sammenhæng mellem den mængde fosfor, der kan ekstraheres med vand, og henholdsvis jordenes fosfortal og fosformætningsgrad. På figurene er de niveauer for vandekstraherbart fosfor og for mætningsgrad, som bliver anset for kritiske i hollandske undersøgelser, indikeret (Blaauw et al., 1988; Chardon & van Faassen, 1999; van der Zee et al., 1990a,b; Breeuwsma & Reijerink, 1992).

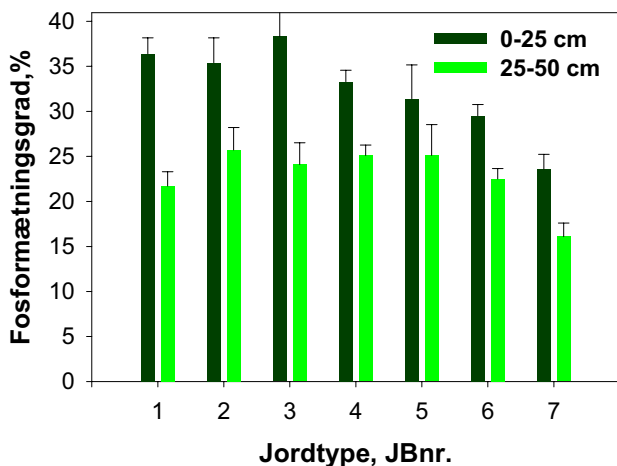


**Figur 3.9** Vandekstraherbart fosfor som funktion af fosfortallet for jordprøver fra dybderne 0-25 og 25-50 cm fra 1986 og 1997 fra KVADRATNETTET. Kun resultater fra jordtyperne JB nr. 1, 4 og 6 er vist. Den lodrette bjælke angiver det dyrkningsmæssigt anbefalede niveau for fosfortallet. Den vandrette bjælke angiver det omtrentlige interval, hvor der ifølge hollandske undersøgelser kan forventes en jordvæskekoncentration på omkring 0,1 mg fosfor/l. (Rubæk et al., 2001).



**Figur 3.10 Vandekstraherbart fosfor som funktion af jordens fosformætningsgrad bestemt ved oxalatekstraktionsmetoden for jordprøver fra dybderne 0-25 og 25-50 cm fra KVADRATNETTET fra 1986 og 1997. Kun resultater fra jordtyperne JB nr. 1, 4 og 6 er vist. Den stiplede linie ved 25% mætning angiver den mætningsgrad, som i Holland betragtes som kritisk. Den vandrette bjælke angiver det omtrentlige interval, hvor der ifølge hollandske undersøgelser kan forventes en jordvæskekoncentration på omkring 0,1 mg fosfor/l. (Rubæk et al., 2001).**

De højeste mætningsgrader er konstateret på sandjorde, som generelt har lavere bindingskapacitet og ofte tilføres forholdsvis store mængder husdyrgødning (figur 3.11). Undersøgelsen viser også en markant stigning i jordens totale indhold af fosfor i løbet af en tiårsperiode fra 1986 til 1997/98. Denne stigning fandt vel at mærke i lige så høj grad sted under pløjelaget (13,4 kg fosfor pr. ha årligt i 25 - 50 cm dybde) som i selve pløjelaget (11,6 kg fosfor pr. ha årligt i 0 - 25 cm dybde). Den store stigning i underjordens indhold af total-fosfor er også et klart tegn på, at overjorden i mange tilfælde ikke længere er i stand til at tilbageholde fosfor i samme grad som tidligere. En høj fosformætningsgrad i pløjelaget fører dog ikke nødvendigvis til en øget fosforbelastning af vandløb og søer, såfremt der ikke er en effektiv hydrologisk eller vindbetinget forbindelse mellem pløjelaget og vandløb eller sø. Det er imidlertid væsentligt at få fastlagt for forskellige danske jordtyper og regioner, hvor dybt et jordlag der medvirker til at fastlægge fosfor, og hvor høje mætningsgrader forskellige jordlag kan tåle at have, før det må anses for kritisk for fosforudvaskningen. Ved fastsættelse af sådanne dybder bør bl.a. dræningsforhold og anden hydrologisk forbindelse mellem jordlagene og vandløb tages i betragtning. De relativt grove analyser af datasættet fra KVADRATNETTET, der er gennemført, er langt fra udtømmende. Det vil f.eks. være muligt at forbedre inddelingen af driftstyper og fosforbelastning ved en fornyet opgørelse. På trods af det systematiske grid som disse data kan relateres til, egner de sig ikke til egentlig kortlægning vedrørende fosforbindingsevne og fosformætning, da skalaen er alt for grov.



**Figur 3.11 Fosformætningsgraden i 1997 bestemt ved oxalatekstraktion i landbrugsjorde i 0-25 og 25-50 cm dybde fordelt på jordtyper (JB numre) (Rubæk et al., 2001).**

#### *Landmandens analyser af jordens fosfortal*

Landmænd får mere eller mindre regelmæssigt jorden fra deres marker analyseret for fosfortal (se f.eks. figur 3.5). Dette tal giver information om jordens fosforstatus med hensyn til plantetilgængelighed på markniveau. Der findes en rimelig sammenhæng mellem et målt fosfortal og forskellige udtryk for jordens fosformætningsgrad (figur 3.9). Fosfortalsanalysen udføres generelt kun i pløjelaget, underjorden analyseres stort set aldrig i denne sammenhæng. Fosfortalsanalyserne udføres på mark eller delmark niveau og kan principielt digitaliseres og kortlægges, men resultaterne tilhører den enkelte landmand. Gennemsnit af analyseresultaterne for de forskellige landsdele bliver opgjort og publiceret årligt i Dansk Landbrugs Oversigt over Landsforsøg, siden analysen blev indført i 1987.

#### *Jordprofiler*

I den landsdækkende profildatabase er der beskrevet omkring 2000 jordprofiler ned til ca. 1,5 m dybde. Profilerne er indsamlet dels i de landsdækkende kvadratnetpunkter i 1987 - 1989 med en gridafstand på 7 km, dels langs DONGs hovedtransmissionslinie i 1981 - 1984 og dels ved jordprofilundersøgelser i Himmerland i 1980. Fosfor (total-fosfor, organisk fosfor og fosfor ekstraheret med citronsyre) er kun målt i en mindre del af profilerne. Derfor er det vanskeligt at bruge profildatabasen direkte til at vurdere danske jordes fosforstatus. Databasen indeholder til gengæld oplysninger om en række af de generelle jordbundskarakteristika, som er væsentlige for jordens evne til at binde og frigive fosfor, og der vil derfor kunne trækkes informationer fra databasen om forskellige væsentlige jordbundstypers egenskaber mht. fosforbinding og frigivelse og disses omfang og omtrentlige udbredelse (se også afsnit 3.2). Da der er beskrevet profiler fra alle kvadratnetpunkter, vil det principielt også være muligt at koble fosformålingerne fra undersøgelsen i KVADRATNETTET med data fra profilbeskrivelsen og sammenstille oplysninger om fosforindhold og fosforbindingskapacitet med jordens generelle egenskaber. En sådan sammenstilling vil være en oplagt måde at

evaluere eller forbedre den foreslåede opskalering og kortlægning af jordes fosforbindende egenskaber, som er skitseret i afsnit 3.2, selv om opgaven vil være behæftet med en række usikkerhedsmomenter, såsom at profilerne er beskrevet og analyseret ud fra de diagnostiske horisonter. De årlige boreprøver, hvor der er lavet fosforanalyser, er derimod udført med faste dybdeinddelinger med 25 cm intervaller.

### **3.4 Monitoring og estimering af fosfortab fra danske landbrugsarealer**

*Brian Kronvang, Gitte Holton Rubæk, Jørgen Djurhuus, Goswin Heckrath, Carl Chr. Hofmann og Ruth Grant*

Vores viden om fosfortabet til vandmiljøet fra forskellige kilder i Danmark stammer først og fremmest fra det landsdækkende overvågningsprogram NOVA. I NOVA estimeres fosfortabet fra landbrugsarealer (dyrkningsbidraget) som differencen mellem det målte totaltab og estimater af andre bidrag. Præcisionen i fastsættelsen af dyrkningsbidragets størrelse er derfor afhængig af, hvor godt alle andre bidrag er estimeret. Da dyrkningsbidraget i NOVA fastsættes ud fra vandløbsmålinger, er det p.t. ikke muligt at opsplitte dyrkningsbidraget yderligere i forhold til, hvorfra (kildeområde) og hvordan (transportvej) fosfor tilføres overfladevandet. Der findes givetvis yderligere og måske også længere tidsserier for fosformålinger i vandløb ved amterne, som kunne supplere vores viden, men det har ikke været muligt at indsamle og sammenstille disse i forbindelse med udarbejdelsen af denne rapport.

Vores viden om kildeområder og transportveje for de diffuse fosfortab fra landbrugsjord er meget spinkelt funderet. Den bygger på få og enkeltstående undersøgelser, der som oftest kun har fokuseret på en af transportvejene i meget begrænsede områder. I dette afsnit gennemgås de kendte kilder til diffuse fosfortab i vandløbsoplande sammen med den eksisterende viden om de forskellige transportveje for fosfor, der alle på forskellig vis har betydning for størrelsen af dyrkningsbidraget.

#### **3.4.1 Baggrundsbidrag**

Baggrundstabet (bidraget) af fosfor benyttes i NOVA ved kildeopsplitning af næringsstofførslen til kystvande og ved beregning af fosfortabet fra de dyrkede type-oplande. Baggrundstabet er defineret som:

*Tabet af opløste og partikelbundne fosforfraktioner fra land til overfladevand målt i skov- og naturoplande med mindre end 10% dyrkning, uden udledninger fra større punktkilder (svarende til 30 personækvivalenter) og belastet med den nuværende atmosfæriske deposition af fosfor.*

Baggrundstabet af fosfor må ikke forveksles med en tilstand uden forstyrrelser eller menneskelig påvirkning (referencetilstanden), hvor f.eks. fosforkoncentrationen skal ligge i et område tæt på den helt uforstyrrede tilstand. I baggrundstabet tillades nemlig i definitionen en påvirkning svarende til op til 10% dyrkning i oplandene. Vandløb i skov- og naturoplandene vil også kunne være påvirket af spildevandsudledninger fra spredt bebyggelse i det åbne land. Hertil kommer, at fosfortabet fra skov- og naturoplande i dagens Danmark i større eller mindre udstrækning er påvirket af tidligere eller nuværende menneskeskabte udnyttelser af landskabet. De fysiske påvirkninger kan være for-



styrrelser fra en tidligere landbrugsproduktion i form af gødning, afvanding, påvirkninger fra den nuværende skovdrift, oprensning af vandløb, mv.

Det baggrundstab, vi måler i små skov- og naturoplande i dag, er derfor højere end referencetilstanden, f.eks. defineret som fosfortabet fra de tilsvarende oplande for 100 - 200 år siden. Baggrundstabt beregnes i dag ud fra årlige målinger i mindre vandløbsoplande. Oplandene er meget små og repræsenterer hovedsageligt sandjordsområder i Danmark.

Baggrundstabt anvendes i dag på to niveauer:

1. Til opgørelse af det dyrkningsbetingede fosfortab fra målinger i dyrkede typeoplande.
2. Til opgørelse af det dyrkningsbetingede fosfortab fra målinger i kystafsnit og hele landet ved kildeopsplitning.

I dag gennemføres en opskalering af baggrundstabt til at gælde for hele den del af det danske landareal, som ikke er befæstet eller ferskvand. Denne opskalering finder sted i forbindelse med den årlige kildeopsplitning af de tilførte mængder af fosfor til kystvandene omkring Danmark.

Baggrundstabt er ikke repræsentativt bestemt for alle typevandløb i Danmark. Det skyldes flere forhold:

- Lerjordsområder og landskaber med havbundsaflejringer er dårligt repræsenteret i datamaterialet.
- Mellemstore og større vandløb og oplande er ikke repræsenteret i datamaterialet med de usikkerheder, der er forbundet hermed i forhold til påvirkninger af dybere grundvandstilstrømning, ændrede transportveje (jorderosion og overfladisk afstrømning) og brinkerosion.

I tabel 3.3 er vist den gennemsnitlige årlige vandafstrømning samt de målte koncentrationer og det beregnede tab af opløst uorganisk orthofosfat (OP), total-fosfor (TP) og 'partikelbundet' fosfor (TP-OP = 'PP') som gennemsnit for 7 skov- og naturoplande i perioden 1993 - 2001. Ved denne beregningsmåde bliver opløst organisk fosfor fejlagtigt kategoriseret som partikulært.

Afstrømningen fra de 7 oplande er meget mindre end fra tilsvarende små landbrugsdominerede oplande. I de 7 skov- og naturoplande var den gennemsnitlige afstrømning 184 mm i perioden 1989 - 2001 mod 299 mm i de 27 tilsvarende små fortrinsvis dyrkede oplande. Forskellen kan formentlig tilskrives betydningen af arealanvendelsen for det hydrologiske kredsløb, idet interception (opfangning i vegetationen) af nedbør og fordampning vil være større i de permanent vegetationsdækkede skov- og naturoplande end i de fortrinsvis dyrkede oplande. Nedbørsoverskuddet og dermed vandmængden til rådighed for overjordisk afstrømning (vandløb) og underjordisk afstrømning (grundvand) er dermed mindre i skov- og naturoplandene end i de fortrinsvis dyrkede oplande. Andre forhold, som spiller ind i de observerede forskelle i afstrømning, er afvandingen af arealerne i de dyrkede oplande (dræning, grøftning, mv.) og eventuelle forskelle i grundvandsstrømning.

Den vandføringsvægtede koncentration af fosfor varierer ikke meget fra år til år. Derimod varierer tabet af fosfor, der er størst i våde år og mindst i tørre år. Kvantitativt er baggrundstabt af fosfor til

mange vandløb domineret af 'partikelbundet P' (tabel 3.3). Partikelbundet fosfor udgør i gennemsnit for de 9 år ca. 60% af det totale fosfortab. Både for opløst fosfat og 'partikelbundet P' er der relativt store år til år variationer (tabel 3.3).

**Tabel 3.3 Gennemsnitligt årligt tab og vandføringsvægtet koncentration af fosforfraktioner fra 7 skov- og naturoplande i perioden 1993 - 2001 (baggrundstabet). Bemærk at partikelbundet fosfor her er beregnet som forskellen mellem total-fosfor og opløst uorganisk fosfat**

	Afstromning	Tab af fosfor			Vandføringsvægtet koncentration af fosfor		
	Q (mm)	Opløst fosfat (kg P/ha)	Total P (kg P/ha)	Partikelbundet P (kg P/ha)	Opløst fosfat (µg P/l)	Total P (µg P/l)	Partikelbundet P (µg P/l)
1993	160	0,028	0,080	0,052	22	56	34
1994	250	0,053	0,136	0,083	24	58	34
1995	221	0,041	0,108	0,067	22	55	33
1996	114	0,022	0,047	0,025	26	54	28
1997	112	0,018	0,040	0,022	22	48	26
1998	172	0,033	0,082	0,049	23	52	29
1999	227	0,056	0,129	0,073	26	59	33
2000	206	0,042	0,088	0,046	23	48	25
2001	192	0,035	0,090	0,055	22	54	32
Gennemsnit	184	0,036	0,089	0,052	23	54	30

### 3.4.2 Spredt bebyggelse

Spredt bebyggelse i det åbne land omfatter spildevandsudledninger fra ejendomme, der enkeltvis eller samlet er på mindre end 30 personækvivalenter (PE). Spredt bebyggelse omfatter typerne:

- sommerhuse
- kolonihaver
- enkeltliggende huse og ejendomme
- små landsbyer
- andet (f.eks. skoler, institutioner, restauranter, rasteplasser, mv.).

I 2001 er det vurderet, at den spredte bebyggelse omfatter i alt ca. 355.000 ejendomme i det åbne land. Heraf er 31% sommerhuse, 59% enkeltliggende huse og ejendomme, 7% landsbyer, 3% kolonihaver og <1% andet. De enkelte ejendomme i den spredte bebyggelse har forskellige renseforanstaltninger. Hovedparten af ejendommene (55%) har anlæg, hvor spildevandet opfylder skærpede krav til fosforfjernelse oftest ved nedsivning. De resterende 45% har mekaniske anlæg med risiko for udledning til overfladevand via eksempelvis dræn. Udledningen af fosfor fra den spredte bebyggelse sker hovedsageligt til ferskvand og kun i mindre grad direkte til marine recipienter (Laursen & Kronvang, 2001). Forudsætningerne for beregning af fosforudledningerne fra spredt bebyggelse er fastlagt af Miljøstyrelsen (Miljøstyrelsen, 1999). Der opereres med 3 opgørelseskategorier:

- A) Omfatter 23% af samtlige ejendomme i 2001, og indeholder oplysninger om ejendomme og renseforanstaltninger.
- B) Omfatter 62% af samtlige ejendomme i 2001, og indeholder oplysninger om ejendomme, men skønnet viden om renseforanstaltninger.
- C) Omfatter 15% af samtlige ejendomme i 2001, hvor såvel antal ejendomme som renseforanstaltninger er skønnet.

Ved opgørelser af fosforudledningen fra den spredte bebyggelse opgøres både en potentiel udledning og en beregnet udvikling. Den potentielle udledning beregnes ud fra erfaringstal for antal personer pr. ejendom, anvendelsesperiode, fosforbelastningen fra 1 personækvivalent (PE) samt antallet af ejendomme. Den beregnede fosforudledning fra spredt bebyggelse inddrager effekten af renseforanstaltninger. I 2001 var den potentielle fosforudledning fra spredt bebyggelse på 666 tons (Miljøstyrelsen, 2002). Den beregnede udledning var på 229 tons fosfor. Den store forskel mellem potentiel udledning og beregnet udledning skyldes hovedsageligt de 55% af ejendommene, som havde renseforanstaltninger, der opfylder skærpede krav til fosforfjernelse i spildevandet.

Udledningerne af fosfor fra spredt bebyggelse er faldet siden midten af 1980'erne formentlig hovedsageligt på grund af indførelsen af fosfatfrie vaskemidler i husholdningerne. Med de gældende beregningsmetoder er det dog vanskeligt at kvantificere, hvor stort faldet har været. Dog er indholdet af fosfor i en PE konstateret at falde i perioden 1987 - 1993 fra 1,5 kg til 1,0 kg fosfor pr. år.

I dag er ca. 298.000 ejendomme i det åbne land omfattet af amternes regionplaner (Miljøstyrelsen, 2002). Alle disse ejendomme skal dog ikke nødvendigvis forbedre renseforanstaltningerne. Det gælder kun ejendomme udpeget til at ligge i oplande til følsomme vandområder. Ca. 84.500 ud af de 298.000 ejendomme omfattet af regionplanerne skal forbedre renseforanstaltningerne. Ved udgangen af 2001 har 107 kommuner udarbejdet spildevandsplaner for det åbne land. Planerne omfatter i alt ca. 40.000 ejendomme. Forbedringerne i renseindsatsen er planlagt til at finde sted over en længere periode, typisk 10 år (Miljøstyrelsen, 2002).

### **3.4.3 Atmosfærisk deposition**

Nedfaldet af fosfor med regn og som partikler kan i større vandområder have betydning som en fosforkilde. Fosfor i atmosfæren stammer fra menneskeskabte aktiviteter som forbrænding af kul, afbrænding af halm og naturlige kilder i form af ophvirvling af jordstøv og biologisk materiale. Våd-depositionen af fosfor måles i nedbøren ved 8 målestationer i Danmark (Ellermann et al., 2000). Den totale deposition af fosfor beregnes ud fra de opsamlede nedbørsmængder og koncentrationen af fosfor i nedbøren i den pågældende periode. Det er derimod vanskeligere at måle tørafsætningen af fosfor med partikler uden for regnperioder. Nyere forsøg på at måle afsætningen af partikelbundet fosfor har vist, at der generelt findes meget lave koncentrationer i luften (Kronvang et al., 2001). De højeste koncentrationer af partikelbundet fosfor i luften blev målt i sensommer og tidligt efterår formentlig som følge af høsten af afgrøder på marker og eventuel halmafbrænding. Den atmosfæriske deposition af fosfor er størst over land og mindst over havet, da kilderne er relateret til udledninger og processer på landjorden. Den atmosfæriske deposition af fosfor over land er typisk på

0,16 kg fosfor pr. ha, mens den over de danske farvande typisk er på 0,08 kg fosfor pr. ha (Kronvang et al., 2001).

#### 3.4.4 Vinderosion

Vinderosion kaldes også jordfygning eller sandflugt. Ved vinderosion blæses jordpartikler fra de såkaldte aflæsningsflader til aflejningsområder. Fosfor kan ved denne proces tabes fra landbrugsjorden som partikulært bundet fosfor i jord eller gødningspartikler. Vinderosion er en naturlig proces, der i høj grad kan fremmes eller hæmmes ved den måde, vi behandler landbrugsarealerne på. Historisk set har vinderosion gjort stor skade i Danmark. Den seneste opgørelse af vinderosionens omfang i Danmark er for perioden 1960 - 1970, hvor der registreredes jordfygning på et areal, der svarer til knap en femtedel af landbrugsarealet. De ramte jorde fandtes fortrinsvis på hævet havbund i Nordjylland, smeltevandsaflejringer i Vestjylland, sandet moræne i Himmerland og på Djursland samt på humusjorde. Kuhlman (1986) har angivet det potentielt følsomme areal til at være 1 – 1,5 mill. ha. Vinderosion forekommer i Danmark fortrinsvis i månederne februar, marts og april i forbindelse med storm og kuling. En forudgående periode med udtørrende vejr forøger omfanget af vinderosion (Kuhlman, 1986).

I det åbne land bemærkes jordfygning dels som støv i luften, dels som driver af sand aflejret i kanaler og grøfter og langs hegn, skel og veje. Vinderosion igangsættes ved, at jordpartikler/aggregater løsrives fra overfladen. Når vindhastigheden er tilstrækkelig høj, kan partikler på størrelse med sandkorn bringes i saltation dvs. hoppende hen over jordoverfladen (Munkholm & Sibbesen, 1997). De salterende partikler kan skubbe til større partikler, når de rammer jorden, så disse partikler evt. kryber eller bliver nedbrudt til mindre partikler. Alle partikler har en kritisk tærskel for løsrivelse og fortsat transport. Finsand lader sig lettest løsrive og bringe i saltation, hvorimod grovsand og grus fortrinsvis bevæger sig ved krybning. Ler og silt ophvirvles lettest i luften og kan derfor transporteres over meget lange afstande (Munkholm & Sibbesen, 1997) og afsættes igen over hav og land som atmosfærisk deposition.

Vinden er den basale faktor, der starter vinderosion. Vinden kan også i samspil med temperaturen indirekte fremme vinderosion ved at udtørre jordoverfladen. Vindens eroderende virkning er afhængig af vindstyrken lige over jordoverfladen. Vindens eroderende virkning anses for proportional med vindhastigheden i 3. potens og omvendt proportional med jordfugtigheden i 2. potens (Chepil et al., 1962).

Vindens styrke og erosionsevne nedsættes af forhindringer på vejen hen over jordoverfladen. I det åbne land udgør læhegn, markskel, bevoksning og bakker naturlige forhindringer. I marken udgør plantedække, afgrøderester og overfladeruhed forhindringer (Munkholm & Sibbesen, 1997).

En god jordstruktur og strukturstabilitet hæmmer vinderosionen. Kuhlman (1986) angiver, at hovedparten af partiklerne skal være mindre end 0,5 mm for at vinderosionen kan opstå. I den internationale litteratur anvendes fraktionen af aggregater  $<0,84$  mm som et mål for jordens eroderbarhed. I USA regnes jorden for ufølsom for vinderosion, hvis  $2/3$  af partiklerne er større end 0,84 mm (Dormaar, 1987). Strukturdannelse i jorden sker i et samspil mellem jordens organiske og

uorganiske bestanddele. Jordens strukturstabilitet afhænger af ler- og vandindhold, pH, organisk stof og jordbearbejdning. Jordbundsbiologien virker stabiliserende på jordstrukturen, dels ved planterødders og svampehyfers sammenbinding af jordpartiklerne, dels ved udskillelse af klisterstoffer. Jordvandet medvirker til at holde sammen på jordpartiklerne ved såkaldte kohæsive kræfter. Ved et lavt vandindhold er de kohæsive kræfter små, hvilket gør jorden mere eroderbar. Kraftig jordbearbejdning eller tromling øger eroderbarheden ved at sønderdele aggregaterne, planere og udtørre jorden (Munkholm & Sibbesen, 1997).

Fosfortabet ved vinderosion er svært at opgøre. Lokalt kan det være stort, medens bidraget til vandløb, søer og fjorde overordnet set er forholdsvist beskedent. Som omtalt ovenfor transporteres den fineste del af jorden langt væk og aflejres over et stort område, medens den grovere del aflejres på bevoksede arealer, i grøfter og kanaler, ved veje og bag hegn. Denne sortering af materialet har stor betydning for fosfortabet, da fosfor primært er knyttet til de fine partikler, der transporteres over stor afstand og aflejres som et lille diffust bidrag over store arealer af både land og hav. Lokalt kan store mængder sand og silt, der dog har et mere beskedent fosforindhold, ende i nærliggende vandløb.

For jordfygningen i 1969 angiver Olesen (1979) flere indberetninger på afslibning af 3 - 5 mm jord, hvorfor 1 mm afslibning ikke kan betragtes som usædvanlig (Munkholm & Sibbesen 1997). Ved afslibning af 1 mm jord tabes der 10-20 tons jord pr. ha. Dette vil svare til et fosfortab fra landbrugsjorden på 6 - 12 kg fosfor pr. ha under forudsætning af et fosforindhold på 566 mg fosfor pr. kg jord (gennemsnit af total-fosformålinger i 1998 i 0-25 cm dybde i dyrkede jorde fra KVADRATNETSundersøgelsen, Jørgen Djurhuus, personlig kommunikation).

### **3.4.5 Vanderosion og overfladeafstrømning**

Når jordens infiltrationskapacitet overskrides, begynder vandet at løbe af på jordoverfladen. Det strømmende vand kan rive jord løs, som skylles med vandet, hvorefter det deponeres i lavninger og vandløbsbræmmer eller transporteres videre til vandløb og søer. Erosion kan foregå som fladeerosion, eller vandet kan samle sig i riller på skrånende arealer. Konvekse skråninger med konkav tværsnitsprofil er mest udsatte for erosion, da den konkave tværsnitsprofil bevirker, at vandet fra et større område samles i en koncentreret strøm. Når de suspendede jordpartikler ned, hvor marken flader ud, er der mulighed for, at jordpartikler aflejres igen. Det er sandfraktionen, der aflejres først, og det er den fine lerfraktion, som også er rigest på fosfor, der har størst risiko for at ende helt ude i vandløbet. Erosion kan derfor lokalt medføre meget store tilførsler af fosfor til vandmiljøet.

Der er stor variation fra år til år i omfanget af rilleerosion på markerne. Dette skyldes, at erosionen typisk opstår i vinterhalvåret i forbindelse med kraftige regnskyl, langvarig regn eller ved tøbrud. Disse klimabetingede faktorer driver jorderosionen. Jordtypen og arealanvendelsen er to andre vigtige parametre for erosionens omfang. Selv om et veletableret plantedække beskytter mod rilleerosion, vil der stadig kunne forekomme overfladeafstrømning af vand på plantedækkede marker. Dette i kombination med frostsprængte planteceller eller nedbrudte planterester kan give store koncentrationer af opløst fosfor i det afstrømmende vand. Også marker, der har fået tilført husdyr- eller

handelsgødning om efteråret, kan være kilder til store tab af opløst fosfor via overfladeafstrømning (Jacobsen et al., 2000; Kronvang et al., 2000).

Erosionsrisiko opstår især ved uhensigtsmæssig arealanvendelse og dyrkning på arealer, der fra naturens hånd har hældning og jordbundsforhold, der befordrer erosion. Om erosionen opstår er så igen afhængig af vejrforholdene. De naturbetingede risikomomenter er knyttet til topografi og jordens infiltrationskapacitet. Et udtryk for den naturbetingede risiko for erosion er kortlagt i et sideløbende projekt på nationalt niveau (se også afsnit 3.7)

Omfanget af overfladeafstrømning og erosion synes at være øget siden 1980'erne i takt med den øgede dyrkning af vintersæd. Vintersædsdyrkingen er dog igen aftaget gennem de seneste år. Selv om omfanget af erosion kan være af økonomisk betydning for landmanden, skal den øgede interesse for erosionsproblematikken først og fremmest søges i, at tabet af næringsstoffer fra landbrugsområder til vandmiljøet vurderes som et alvorligt miljøproblem.

Feltstudier kan bruges til at karakterisere problemer med rilleerosion i danske dyrkningssystemer. Et fællesprojekt mellem DJF og DMU har i 6 år målt erosion i vinterhalvåret på i alt 189 skrånende landbrugsarealer i Danmark, der dækkede forskellige jordbundstyper og dyrkningsforhold. En oversigt over de registrerede erosionsdata er givet i tabel 3.4. Hovedformålet med projektet var at indsamle data til opbygning af et ekspertsystem, der indrager både topografiske, jordbunds-, klima- og afgrødemæssige forhold til forudsigtelse af erosion. Ekspertsystemet vil snarest blive publiceret. Eksempler på ekspertsystemets evne til at håndtere forskellige afgrøde/dyrknings- og klimabetingelser er givet i figur 3.12 og 3.13.

**Tabel 3.4 Oversigt over erosionsmålinger (rilleerosion). Målingerne er foretaget i foråret og repræsenterer perioden fra sidste jordbearbejdning, dog maksimalt et år tilbage (Jørgen Djurhuus, personlig meddelelse)**

	Alle afgrøder <sup>1)</sup>				Kun afgrøder med erosion <sup>2)</sup>			Kun marker med erosion m <sup>3</sup> /ha			
	Gns. m <sup>3</sup> /ha	Total, n	Med erosion, n	Med erosion, %	Gns. m <sup>3</sup> /ha	Total, n	Med ero- sion, %	Gns.	Me- dian	Min.	Maks.
1994	1,65	67	32	48	1,88	59	54	3,46	1,90	0,02	14,82
1995	0,42	61	16	26	0,45	56	29	1,58	0,93	0,20	4,02
1996	0,15	70	20	29	0,18	59	34	0,54	0,21	0,03	3,25
1997	0,76	72	35	49	0,84	65	54	1,56	0,55	0,01	28,35
1998	0,13	131	26	20	0,15	117	22	0,65	0,44	0,08	1,83
1999	0,19	123	32	26	0,26	90	36	0,73	0,26	0,02	5,39
Gns. <sup>3)</sup>	-	-	-	33	-	-	-	1,42	0,72	-	-

<sup>1)</sup> Græs/kløvergræs, stubmark, korn/raps, juletræer, pløjet og stubharvet.

<sup>2)</sup> Korn/raps, juletræer, pløjet og stubharvet.

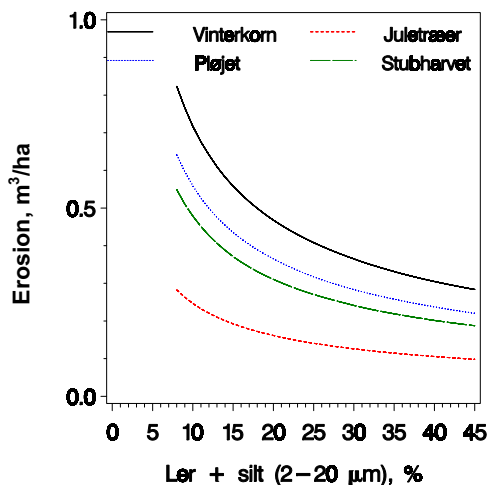
<sup>3)</sup> Gennemsnit over år.

Ekspertsystemet er opbygget med hensyntagen til de skævheder, der er i det grundlæggende datasæt som følge af, at variationen i jordtyper, klima og afgrødevalg er uensartet fordelt over landet. Systemet kan på nuværende tidspunkt kun håndtere de undersøgte dyrknings- og afgrødeforhold, men

vil forholdsvis let kunne videreudvikles til f.eks. også at omfatte andre afgrøde- og dyrkningsforhold, såfremt der i nye projekter skabes et datagrundlag herfor.

I den udenlandske litteratur kan man finde eksempler på inddelinger af forskellige afgrøder i forskellige risikoklasser mht. erosionssårbarhed. Sådanne inddelinger kan ikke ukritisk overføres til danske forhold, da erosionsårbarheden vil afhænge af den kulturteknik, man anvender i de enkelte lande og af de lokale vejrforhold. I det ovenfor beskrevne danske projekt indgik 6 forskellige afgrøde/dyrkningsforhold: græs/kløvergræsmarker, stubmark, korn/rap, pløjet, stubharvet og juletræsbeplantning. Af de 6 afgrøde/dyrkningsforhold blev der på intet tidspunkt registreret rilleerosion i græs/kløvergræsmarker og i stubmark. Figur 3.12 illustrerer sårbarhederne af de fire afgrøde/dyrkningsforhold, hvor der er målt erosion på forskellige jordtyper.

Af klimatiske forhold har man ved de danske feltstudier fundet, at følgende har betydning for omfanget af erosion (indgår i ekspertsystemet): nedbør og snesmeltning på frossen jord, sommeret nedbør for dage med nedbør over 8 mm og antal dage med nedbørsintensitet over 20 mm pr. døgn. Ydermere viser studierne, at de naturgivne parametre som længde og stejlhed af et areal medvirker til forøget risiko for erosion, mens et stigende indhold af ler og silt (0 - 20  $\mu\text{m}$ ) nedsætter risikoen.

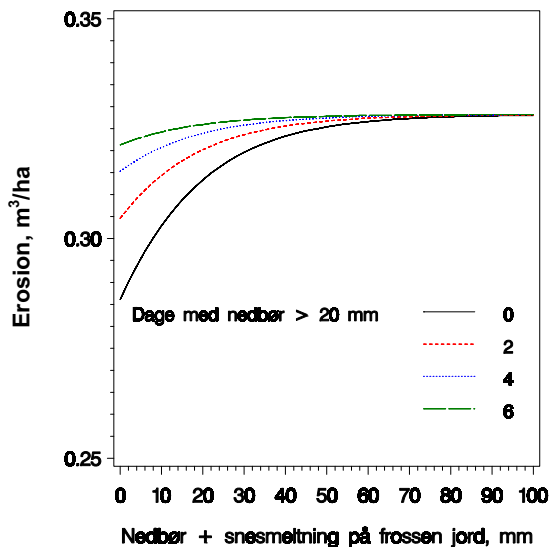


**Figur 3.12** Erosionsmodellens prediktion af rilleerosion som funktion af indholdet af ler plus silt for afgrøde- og dyrkningsforhold på en mark i vinterhalvåret. Der er antaget minimal erosionsrisiko svarende til nordvendt skrænt og intet vandstandsende lag. Andre parametre er fastholdt på niveauer, der giver gennemsnitlig erosion: Nedbør+ snesmeltning på frossen jord er sat til 12 mm, LS-faktor (længde/hældningsfaktor) på 2.75, 99% fraktil for LS faktoren er sat til 15, sommeret nedbør for dage med nedbør > 8 mm er sat til 230 mm og antal dage med nedbør >20 mm er sat til 2, hvilket alle svarer til gennemsnitlige værdier (Djurhuus et al., 2005, under udarbejdelse).

Af dyrkningsbetingede faktorer medvirker en større overfladeruheid til at nedsætte risikoen, mens et vandstandsende lag forøger risikoen betydeligt. Vandstandsende lag kan være både menneske- og

naturskabte, men i begge tilfælde vil det være muligt at reducere effekten af et sådant lag. Desuden er der på sydvendte skråninger fundet større risiko for erosion end på nordvendte som følge af, at der på sydvendte skråninger oftere opstår frost/tø situationer end på nordvendte.

Da omfanget af erosion i alt overvejende grad bestemmes af en kombination af naturgivne forhold, såsom topografi, jordbund og klima og de menneskeskabte dyrkningsforhold, bør der ved vurderingen af mulige tiltag tages udgangspunkt i den konkrete lokale situation, hvis man ønsker at sætte ind med tabsbegrænsende foranstaltninger. Vurderet ud fra denne undersøgelse vil de eneste tiltag, der helt fjerner risikoen for erosion, være at tage et areal ud af omdriften eller lade det ligge hen som stubmark i vinterhalvåret. Undersøgelsen omfatter dog ikke alle eksisterende og mulige fremtidige afgrøder og dyrkningsteknikker, og der vil givetvis kunne udvikles andre former for erosionsbeskyttende dyrkningsteknikker.



**Figur 3.13 Erosionsmodellens prediktion af rilleerosion i stubharvede marker ved forskellige vejrscenarier. Der er antaget minimal erosionsrisiko svarende til nordvendt skrænt og uden vandstandsede lag. Sommeret nedbør for dage med nedbør >8 mm er sat til 600 mm, hvilket svarer til maksimal erosionsrisiko for denne parameter. Følgende modelparametre er sat til gennemsnitlige værdier for disse faktorer: LS (længde/hældnings)-faktoren er 2,75, 99% fraktilen for LS faktoren er 15 og indholdet af ler+ silt (0-20 µm) er 20% (Djurhuus et al., 2005, under udarbejdelse).**

Som det ses af tabel 3.4, er erosionsomfanget i Danmark generelt beskedent. I gennemsnit over de 6 vinterhalvår har der fundet erosion sted på 33% af markerne, og på disse marker har erosionen i gennemsnit pr. år været fra 0,5 m³ pr. ha til 3,5 m³ pr. ha. Den gennemsnitlige erosion på erosions-truede arealer i resten af Europa er anslået til ca 1,6 m³ jord pr. ha om året (Cerdan et al., 2003). Tallene viser derfor, at potentialt for erosionskontrol på erosionstruede arealer vil kunne udnyttes i Danmark til gavn for miljøet, da 1 m³ jord i gennemsnit i Danmark indeholder ca. 0,79 kg fosfor (forudsætninger, se tabel 3.5).



I forbindelse med estimering af jorderosion forårsaget af rilleerosion i Danmark kan ovennævnte data anvendes. Derimod eksisterer der ikke danske data, som kan anvendes til estimering af jorderosion forårsaget af fladeerosion, og data omkring tab af opløste næringsstoffer ved overfladeafstrømning er generelt meget sparsomme. De eneste konkrete målinger af fosforkoncentrationen i afstrømmende vand er gjort i forbindelse med studier af bufferzoner (se afsnit 3.5.2).

**Tabel 3.5 Beregnet mobilisering ved rilleerosion**

	Jord <sup>1)</sup>		Total-P <sup>3)</sup>	
	m <sup>3</sup> /ha	kg/ha <sup>2)</sup>	kg/ha <sup>1)</sup>	kg/ha <sup>4)</sup>
Gennemsnit	1,42	1988	1,13	0,37
Median	0,72	1008	0,57	0,19

<sup>1)</sup> Kun marker med erosion, fra tabel 3.4.

<sup>2)</sup> Beregnet med volumenvægt på 1400 kg/m<sup>3</sup>.

<sup>3)</sup> Beregnet ud fra total-fosfor på 566 mg/kg, hvilket er gennemsnit af kvadratnetpunkter 1997/98 (Rubæk et al., 2000) for JBnr. 1-7, med de syv jordtyper ens vægtet.

<sup>4)</sup> Vægtet i forhold til at der kun har været erosion på 33% af markerne.

De eroderede jordpartikler sorteres som nævnt i forbindelse med erosionsprocessen, således at de mindste partikler transporteres længst. Fosforkoncentrationen i det sediment, der ender i vandmiljøet, kan derfor være noget større end fosforkoncentrationen i udgangsjorden. Dette forhold blev belyst i ploterosionsstudier på danske jordtyper i 1989 og 1990 (tabel 3.6) på Foulum og Ødum morænejord med henholdsvis jordtype JB4 og JB6. Forsøgsparecellernes hældning var henholdsvis 10,4% og 9,6%. Til vinterhvede blev der pløjet om efteråret og sået op og ned af bakken. Sort brak blev pløjet om foråret og harvet gentagne gange som ukrudtsbekæmpelse. Sedimenterne blev samlet op for enden af de 22,1 x 3 m store parceller og havde en større fosforkoncentration end udgangsjorden. Ved transport over længere afstande vil der kunne ske en yderligere sortering.

**Tabel 3.6 Erosion, fosfortab og fosforkoncentrationer i jord og sediment fra plotforsøg i vinterhalvåret 1989/90. Gennemsnit af to gentagelser (Sibbesen, 1995)**

	Foulum, JB4		Ødum, JB6	
	Vinterhvede	Sort brak	Vinterhvede	Sort brak
Erosion, kg/ha	1669	1121	152	2312
Total-fosfortab, kg/ha	2,96	2,42	0,26	3,17
Total-fosfor jord, mg/kg	984 <sup>1)</sup>	1,080	696 <sup>1)</sup>	684
Total-fosfor sediment, mg/kg	1689 <sup>1)</sup>	2057	1204 <sup>1)</sup>	1320

<sup>1)</sup> Data fra et enkelt plot.

### 3.4.6 Brinkerosion

I Danmark har vi ca. 65.000 km vandløb, der groft kan fordeles på 3 størrelseskategorier (tabel 3.7). I langt de fleste tilfælde vil disse vandløb naturligt være mæandrerende lavlandsvandløb. Mere end

90% af de danske vandløb er dog i dag mere eller mindre udrettede, lige kanaler som følge af afvandingen af ådalene til landbrugsformål og bymæssig bebyggelse (Brookes, 1984).

**Tabel 3.7 Længden af danske vandløb opgjort på 3 bredder af vandløb (AIS-vandløb)**

< 2 meter brede	2-8 m brede	> 8 m brede	I alt
49.400 km	14.700 km	1.600 km	65.700 km

Brinkerrosion foregår til stadighed i alle vandløb som et naturligt element i de vandløbs- og ådalsformende processer. Over lange tidsrum (dekader/århundreder) flytter vandløbet sig rundt i ådalen ved den gnavende (eroderende) virkning af vandets kræfter i mænderbuer. På denne måde gennemgraver vandløbet sin ådal og eksporterer med forsinkelse aflejret sediment fra oplandet videre ud mod havet.

Brinkerrosion kan naturligt opdeles i to overordnede processer:

1. Strømningsbetinget erosion i brinker. Denne proces foregår til stadighed på ydersiden af mænderbuer, hvorfra brinkmateriale især bortroderes ved brinkens fod. På lige strækninger af vandløbet foregår processen også, men her i direkte konkurrence med aflejringen af sediment. Om der bliver tale om en nettoerosion eller -aflejring vil være afhængig af en række forhold som: i) Input af sediment fra oplandet. ii) Det strømmende vands evne til at transportere sediment i form af mængden (transportkapacitet og kornstørrelser (kompetence). iii) Brinkens udformning (hældning, bevoksning, mv.).
2. Kollaps af brinker – brinkskred. Denne proces sker også naturligt på ydersiden af mænderbuer, hvor den strømningsbetingede erosion udhuler foden af brinken til den kollapse og styrter ned i vandløbet. På lige strækninger af vandløb vil processen også forekomme, dels hvis der er tale om en nettoerosion ved foden af brinker med efterfølgende udhulning og brinkkollaps, dels ved en langsom nedglidning af brinkmateriale mod bunden på grund af stejle brinker.

Endelig er der en tredje brinkerrosionsproces, som er direkte forårsaget af menneskelige forstyrrelser. Det drejer sig om kreaturers nedtrampning af brinker ved vandingssteder, lystfiskeres nedtræden af brinker, tunge landbrugsmaskiner, der kører tæt på vandløb og destabiliserer brinken, maskinelt arbejde i selve vandløbet ved oprensninger, udretninger, mv.

De to naturlige brinkprocesser hænger som ovenfor beskrevet meget tæt sammen. Størrelsen af den naturligt forekommende brinkerrosion er ikke kvantificeret i danske vandløb. Tilsvarende findes der kun få kvantitative opgørelser af brinkerrosion i større danske vandløb og vandløbssystemer (Laubel et al., 1999).

I et nyligt afsluttet forskningsprojekt er der gennemført målinger af brinkerrosion i 15 mindre, udrettede vandløb i Danmark (Laubel et al., 2000; 2003). Undersøgelserne blev udført på i alt 33 vandløbsstrækninger i de 15 vandløb med opsætning af i alt 1.500 erosionspinde til måling af brink-

erosionens omfang (Kronvang et al., 2002; Laubel et al., 2003). Formålet med målingerne af brinkerosion var dels at kvantificere brinkerosionens betydning som kilde til sediment og fosfor i vandløb, dels at forsøge at afdække de styrende faktorer for brinkerosion i mindre udrettede danske vandløb.

Undersøgelserne har vist, at brinkerosion i mindre vandløb kan være af meget stor betydning som en kilde til sediment- og fosfortransport. Erosionen målt ved de enkelte erosionspinde var i gennemsnit på 11,1 mm pr. år (CV = 241%) over de 2 år, målingerne foregik. Brinkerosionens omfang varierer betydeligt fra sted til sted, som det også fremgår af den store variationskoefficient. Den gennemsnitlige brinkerosion var statistisk signifikant større i omfang i brinker, der støder op til landbrugsarealer (12,0 mm pr. år) end i de brinker, der støder op til udyrkede arealer (7,6 mm pr. år).

Tilførslen af jord og fosfor til vandløb ved brinkerosion er opgjort på baggrund af målingerne i de 15 vandløb. Tilførslen af fosfor udgjorde mellem 0,1 - 0,3 kg fosfor pr. ha oplandsareal. Forskellen er alene afhængig af hvor stor en andel af brinkjorden, der forventes at blive transporteret væk fra oplandet. Den lave tabsrate på 0,1 kg fosfor pr. ha er således beregnet ud fra den forudsætning, at kun det fosfor, der er bundet i ler/silt materialet i brinkerne, transporteres videre. Tabsraten på 0,3 kg fosfor pr. ha er, hvis alt det fosfor, som er målt i brinkmaterialet, transporteres videre. Tabsraten for fosfor kan også og måske bedre udtrykkes som et tab pr. løbende meter vandløb. Tabet er her på 6,7 - 15,8 g fosfor pr. løbende meter vandløb.

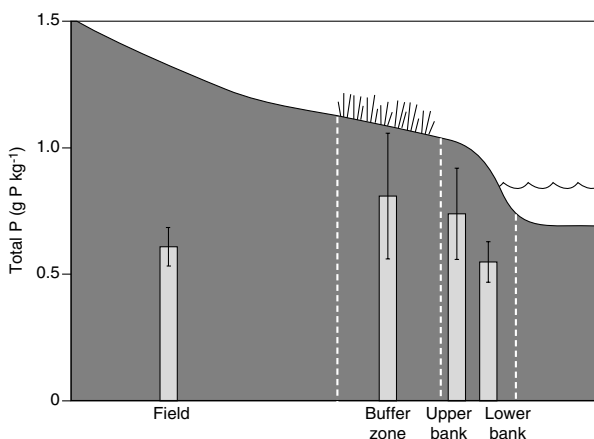
En sammenligning med den gennemsnitlige målte transport af total-fosfor i de samme 2 år i 14 lignende små oplande viste, at fosfortabet fra brinkerosion som kilde kunne forklare 15 - 40% (Laubel et al., 2003). Andre danske undersøgelser af brinkerosionens omfang og betydning for fosfortab er vist i tabel 3.8. Samlet kan det konkluderes, at alle undersøgelser indikerer, at brinkerosion er af væsentlig betydning for den målte transport af fosfor i vandløb.

**Tabel 3.8 Oversigt over danske undersøgelser, som har beskæftiget sig med at opgøre brinkerosionens betydning for sediment-, jord-, og fosfortransport i vandløb**

Undersøgelse	Lokalitet	Metode	Brinkerosion	Fosfortab
Laubel et al., 2003	33 mindre vandløb i hele landet	In situ målinger med erosionspinde	11,1 mm/år	0,1-0,3 kg
Svendsen & Kronvang, 1995	Gjern Å, hovedløb	Massebalance	30 mm/år	0,3-0,5 kg P/ha
Laubel et al., 1999	Gjern Å, alle vandløb	In situ målinger med erosionspinde	10 mm/år	Ikke beregnet
Hasholt, 1988	To mindre vandløb	Massebalance	40-80% af suspenderet stof	Ikke beregnet
Kronvang et al., 1997	Gelbæk	Massebalance	Ikke målt	75-89% af partikulært P

De hidtil gennemførte undersøgelser kan ikke anvendes til at svare på spørgsmålet om, hvor stor indflydelse de menneskeskabte påvirkninger har på brinkerosion i danske vandløb. Det skyldes primært, at der ikke er gennemført undersøgelser med det formål for øje i Danmark. Derudover er dog en lang række faktorer, som via menneskeskabte påvirkninger må have indflydelse på brinkerosion og den medfølgende tilførsel af jord og fosfor til vandløb. Efterfølgende angives nogle af de vigtigste faktorer:

1. Udretning og kanalisering af vandløb har gjort vandløb dybtliggende med meget stejle brinker, der ved strømningsbetinget erosion ved brinkens fod, let kollapser eller langsomt glider ned.
2. I det vandløbsnære område (bræmme og bufferzone) og i brinkmaterialet er der et unaturligt højt fosforindhold (figur 3.14), som formentlig kan tilskrives menneskelige aktiviteter (fosfortilførsel til landbrugsjord og mere jorderosion på marker; oprensning af vandløb).
3. Vandløbsvedlighedsniveauet er med til at øge brinkerosionens omfang.
4. Andre påvirkninger som kreaturs nedtrampning mv.



**Figur 3.14** Indholdet af total-fosfor ved dyrkede arealer langs 15 mindre, danske vandløb. Søjlerne viser det gennemsnitlige indhold af total-fosfor i overjord fra mark, bræmme, samt øvre og nedre vandløbs-brink. Øvre og nedre 95%-konfidensinterval er vist som lodrette streger på hver søjle (Laubel et al., 2003).

Vandløbsvedlighedsniveauet har, som den tidligere er blevet praktiseret, været med til at fremme brinkerosion. Skånsom vandløbsvedlighedsniveau, som ofte praktiseres i dag, er derimod med til at beskytte vandløbet mod brinkerosion. Ved skånsom vandløbsvedlighedsniveau kan man f.eks. vælge kun at skære grøde i vandløbets naturlige strømnende og i stort omfang lade grøden stå inde langs brinkerne. Brinkerne beskyttes på den måde mod erosion. Vælger man at gå et skridt videre og påvirker strømnenden, så den helt følger vandløbets naturlige tendens til mæandring, kan man enkelte steder også skære grøde inde langs brinkkanten. Derved kan man få den helt lokale effekt, at brinkerosionen fremmes på netop det sted, hvilket på kort sigt er en ulempe, da sediment og fosfor tilføres vandløbet herfra. Over en lang årrække er det dog en fordel at opnå en naturlig fysisk tilstand med

mæandring i vandløbet - med talrige muligheder for tilbageholdelse af sediment og fosfor i vandløbssystemet.

### 3.4.7 Nedvaskning til dræn og øvre grundvand

Nedvaskning af fosfor betragtes nu som en væsentlig tabsvej for fosfor, efter at den tidligere nærmest blev ignoreret. Som beskrevet tidligere viser mange danske landbrugsjorde en betydelig mætningsgrad og dermed en aftagende bindingskapacitet for fosfor i det øverste jordlag. Specielt på de lerede jorde har underjorden fortsat en stor ledig bindingskapacitet for fosfor. At fosfor alligevel ikke altid bliver bundet i underjorden, når det nedvaskes på disse jorde, kan skyldes, at der forekommer en form for præferencestrømning igennem jordprofilen. Især afstrømning igennem makroporer, som f.eks. regnormegange, kan transportere opløst og partikelbundet fosfor hurtigt nedad uden den nødvendige tidlige og rumlige kontakt med underjordens matrice, som muliggør fosforbinding. Nedvaskning af fosfor til drænrør er i høj grad forbundet med makroporestrømning. Makroporestrømning og fosfortransport på strukturerede lerjorde er undersøgt i en række laboratorieforsøg (Jensen et al., 1999; Jensen et al., 2000; de Jonge et al., 2002; Magid et al., 1999; Rubæk et al., 2002) og i kontrollerede markforsøg på små arealer (f.eks. Laubel et al., 1999) med henblik på at øge vores forståelse for denne form for fosfortransport og de faktorer, der er væsentlige for dens omfang.

Nedvaskning i sandjorde er generelt dårligt belyst under danske forhold. Den vil formentlig også her variere betydeligt for forskellige typer af sandede jorde (se tidligere afsnit), specielt med variationerne i underjordenes fosforbindingskapacitet, vandbevægelse og nærheden til et grundvandspejl. Generelt forventes fosformedvaskningen i sandede jorde at være præget af en mere ensartet vandbevægelse gennem større dele af underjordsmatricen, men præferencestrømning kendes også i sandjorde, om end den oftest vil have en anden karakter og et andet omfang end på lerjordene (de Jonge et al., 1999). Betydningen af præferencestrømning for fosfortransporten på sandede jorde kendes ikke. Sikker er det dog, at præferencestrømning er afgørende for, ad hvilken vej og hvor hurtigt vandet løber gennem jorden, før det bliver til grundvand eller når frem til et vandløb. Jo mere koncentreret og hurtigere vandet strømmer fra jord til overfladevand, jo færre chancer er der for, at fosfor kommer i kontakt med de frie bindingsflader i jordmatricen, hvorpå det kan bindes.

Har de jordlag, der ligger over grundvandspejlet, en begrænset fosforbindingskapacitet, og overstiger fosformætningsgraden i jordlagene et kritisk niveau, vil nydannet grundvand have en forhøjet fosforkoncentration. På sandede jorde i Holland og Belgien har man kritisk høje fosformætningsgrader til så stor dybde, at grundvandets fosforindhold påvirkes. Disse høje mætningsgrader er opstået på grund af lang tids store tilførsler af husdyrgødning. Sådanne tilstande er vanskelige at rette op på, og det kan kun gøres over lange tidshorisonter. I NOVA findes der fem oplande med i alt 31 marker, hvor der monitoreres for fosforudvaskning fra rodzonen ved hjælp af teflonsugeceller og 36 marker, hvor der monitoreres på det øvre grundvand i borer. For både sugecelle- og for boreringsmålinger gælder, at der kun tages højde for opløst uorganisk fosfor. Som gennemsnit er fosforudvaskningen her lav, men på nogle marker og i specielle situationer er der konstateret høje koncentrationer. Vi mangler i høj grad viden om fosforudvaskningens omfang, og i hvilke situationer og på hvilke jorde den måtte være kritisk for vandmiljøet i Danmark, og vi er p.t. ikke i

stand til at udpege mulige risikoområder. I det efterfølgende gennemgås det eksisterende datagrundlag vedrørende fosfordrivning til dræn, fosfordrivning fra rodzonen og fosforkoncentrationer i det øvre grundvand.

#### *Nedvaskning til dræn*

Nedvaskning af fosfor til dræn er bl.a. undersøgt ved hjælp af regelmæssige (typisk en ugentlig prøve) stikprøveudtagning af drænvand (Simmelsgård, 1996; Pedersen, 1983; Hansen, 1981; Kjellerup & Kofoed, 1983). Kombineret med viden om afstrømning og drænet areal er disse resultater blevet brugt til at beregne fosfortabet via drænene. Resultater fra disse undersøgelser er sammenstillet i tabel 3.9.

**Tabel 3.9 Vandføringsvægtede fosforkoncentrationer og -tab målt i drænvand fra agerjord (efter Munkholm & Sibbesen, 1997)**

Sted	Jordtype	Prøver	Periode	PO <sub>4</sub> -P		Total-P		Nedvasket PO <sub>4</sub> -P		Nedvasket Total-P		Reference
				Gns.	Var. bredde <sup>1)</sup>	Gns.	Var. bredde <sup>1)</sup>	Gns.	Var. bredde <sup>1)</sup>	Gns.	Var. bredde <sup>1)</sup>	
		Hyp-pighed		mg/l		mg/l		g/ha		g/ha		
Åbenrå	lerjord	1-2/14 dg	1974-91	0,08	0,01-0,30	mangler	mangler	345	12-1215	mangler	mangler	Sim-mels-gaard,1996
Næstved	sandbl.lerj.	-	-	0,04	0,00-0,23	-	-	47	0-288	-	-	-
Norring	sandbl.lerj.	-	-	0,04	0,01-0,17	-	-	45	1-252	-	-	-
Lunding	sandbl.lerj.	-	-	0,07	0,01-0,30	-	-	82	3-435	-	-	-
Silstrup	sandbl.lerj.	-	-	0,12	0,02-0,65	-	-	228	35-988	-	-	-
Herlufmag-le	sandbl.lerj.	-	1971-78	0,05	0,01-0,07	-	-	62	5-116	-	-	Pedersen, 1983
Ruds-Vedby 1	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,03	-	-	25	2-40	-	-	-
Ruds-Vedby 2	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,06	-	-	28	2-46	-	-	-
Fjelstrup 1	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,04	-	-	25	5-51	-	-	-
Fjelstrup 2	lerjord	-	-	0,06	0,05-0,07	-	-	77	6-159	-	-	-
Fjelstrup 3	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,03	-	-	17	2-29	-	-	-
Daugård	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,03	-	-	23	6-41	-	-	-
Ørum	sandbl.lerj.	-	-	0,01	0,01-0,02	-	-	20	7-32	-	-	-
Odder 1	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,03	-	-	18	5-33	-	-	-
Odder 2	sandbl.lerj.	-	-	0,07	0,02-0,11	-	-	58	2-120	-	-	-
Bjerringbro	sandbl.lerj.	-	-	0,01	0,00-0,01	-	-	8	1-20	-	-	-
Højer	sandbl.lerj.	1/uge	1971-84	1,10 <sup>2)</sup> 1,29 <sup>3)</sup>		-	-	2540 3840		-	-	Pedersen, 1985
Skjernåda-len	mosejord	-	-	0,06		-	-	200		-	-	-
Ll. Eges-gård	lerjord	1/uge	1977-80	0,031	0,027-0,037	-	-	43	35-51	-	-	Hansen, 1981
Støls-gård	lerjord	-	-	0,020	0,016-0,025	-	-	34	32-35	-	-	-
Sdr. Sten-derup	lerjord	0,2% af af-strømm	1973-76	0,050	0,028-0,063	-	-	60	0-180	-	-	Kjellerup & Kofoed, 1979
Højvads Rende 102	lerjord	1/uge	1990-95	0,022	0,011-0,027	0,020 <sup>4)</sup>	0,004-0,034 <sup>4)</sup>	47	31-84	354 <sup>4)</sup>	7-67 <sup>4)</sup>	Grant et al., 1996a
103	sandbl.lerj.	-	-	0,014	0,011-0,018	0,022	0,014-0,037	35	9-56	50	11-103	-
104	sandbl.lerj.	-	-	0,013	0,012-0,014	0,010 <sup>4)</sup>	0,003-0,014 <sup>4)</sup>	19	11-30	14 <sup>4)</sup>	3-21 <sup>4)</sup>	-
105	sandbl.lerj.	-	-	0,019	0,009-0,048	0,028	0,015-0,062	37	16-87	58	21-112	-
106	sandbl.lerj.	-	-	0,156	0,147-0,252	0,199	0,167-0,251	182	52-408	203	80-485	-
Lillebæk 401	lerjord	-	-	0,015	0,007-0,025	0,081	0,010-0,208	15	2-38	89	12-252	-
402	sandbl.lerj.	-	-	0,014	0,009-0,021	0,028	0,022-0,036	31	21-41	69	33-141	-
404	sandbl.lerj.	-	-	0,009	0,005-0,031	0,025	0,012-0,061	14	5-21	37	10-61	-
406	sandbl.lerj.	-	-	0,034	0,004-0,107	0,078	0,022-0,180	30	10-77	214	37-880	-
Gelbæk 1	sandbl.lerj.	-	1993-1994	0,085		0,111		288		298		Grant et al., 1996b
Gelbæk 2	sandbl.lerj.	-	-	0,010		0,020		22		43		-

<sup>1)</sup> Variationsbredde, forskel imellem årsgennemsnit.

<sup>2)</sup> Drændybde 80 cm.

<sup>3)</sup> Drændybde 115 cm.

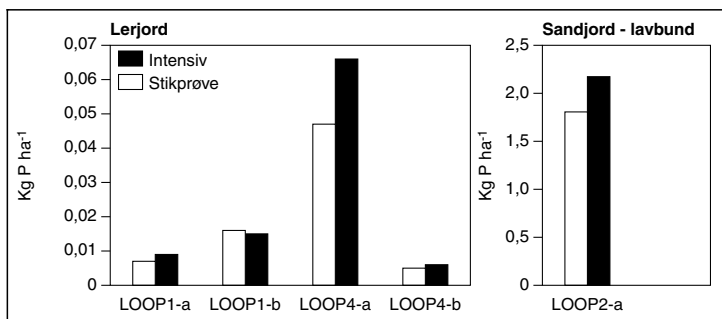
<sup>4)</sup> Kun for årene 1990-92.

Man er senere blevet klar over, at man med denne metode underestimerer fosfortabet via dræn betydeligt, tabel 3.10 (Grant et al., 1996b). Ligeledes har man ofte kun målt på opløst fosfor, og dermed negligeret de stærkt varierende og til tider store koncentrationer af partikulært fosfor, der kan udvaskes med dræn.

**Tabel 3.10 Fosfortab via drænaftstrømning fra maj 1993 og til april 1994 estimeret ved hhv. ugentlig stikprøveudtagning og ved intensiv prøveudtagning (Grant et al., 1996b)**

	Tab estimeret ved ugentlige stikprøver kg P/ha/år	Tab estimeret ved intensiv prøvetagning kg P/ha/år	Procentuel underestimering ved ugentlig stikprøvetagning
Gelbæk 1	0,298	0,627	-110
Gelbæk 2	0,043	0,098	-130
Lillebæk 1	0,102	0,169	-66
Lillebæk 2	0,057	0,071	-26

I 1999/00 og 2000/01 er der foretaget intensiv prøvetagning fra to dræn i LOOP 1 og i LOOP 4 og fra ét dræn i LOOP 2. Der er foretaget en tidsproportional prøvetagning i form af timeprøver puljet til en ugentlig prøve. Resultaterne heraf viser, at transporten af opløst fosfor var omtrent uafhængig af prøvetagningsstrategi, mens transporten af total-fosfor ved stikprøvetagning var underestimeret med 1 - 48% i 1999/00 og med 0 - 29% i 2000/01 i forhold til den intensive prøvetagning (figur 3.15) (Grant et al., 2002).



**Figur 3.15 Sammenligning af dræntab af total-fosfor ved henholdsvis intensive målinger (timeprøver puljet ugentligt) og stikprøver (generelt ugentligt) i dræn på lerjord og sandjord i 3 landovervågningsoplande (Grant et al., 2002).**

Den generelle overvågning af drænvand i NOVA i hele perioden fra 1989 og frem til nu omfatter målinger på 6 dræn i to fortrinsvis lerede oplande. Tabet af opløst fosfor og total-fosfor fra disse drænvandstationer er vist som årlige gennemsnit i tabel 3.11. LOOP 1 ligger på Lolland, og der måles på 2 dræn. LOOP 4 ligger på Fyn, og der måles på 4 dræn. Generelt er der tale om forholdsvis små tab af både total-fosfor og opløst fosfor fra de 6 dræn i de 2 oplande. Fosfortabet fra dræn varierer dog en del, og er størst i år med stor vandafstrømning. I et enkelt dræn er der konstateret meget større tab af fosfor end de viste i tabellen nedenfor. Data fra dette dræn er vist særskilt i tabel 3.12 og indgår derfor ikke i gennemsnitsberegningerne i LOOP 1 og LOOP 4. Tabet af fosfor i drænvand er markant større fra denne mark end gennemsnittet fra de øvrige drænedede arealer. Det større fosfor-



tab kan skyldes flere forhold, men væsentligt er det, at fosforstatus for arealet er meget høj (Pt = 10,7), mens jordbund og driftsforhold ligner de to øvrige dræn, der er målt på i LOOP1.

**Tabel 3.11 Gennemsnitlig årlig afstrømning og tab af total-fosfor og opløst orthofosfat fra drænen i 2 NOVA oplande. Bemærk, at der er beregnet for hydrologiske år (juni-maj)**

<i>Opland</i>	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98
<i>LOOP 1</i>									
Afstrømning (mm)	116	242	134	101	272	260	3,9	25,3	94,5
Total P (kg P/ha)	0,020	0,089	0,020	0,017	0,073	0,067	0,002	0,010	0,018
Opløst P (kg P/ha)	0,017	0,071	0,018	0,012	0,026	0,036	0,001	0,005	0,012
<i>LOOP 4</i>									
Afstrømning (mm)	95	162	96	98	279	237	4,9	24,4	97,7
Total P (kg P/ha)	0,059	0,036	0,042	0,064	0,094	0,121	0,007	0,006	0,023
Opløst P (kg P/ha)	0,027	0,020	0,017	0,024	0,018	0,028	0,004	0,003	0,010

**Tabel 3.12 Årlig afstrømning og tab af total-fosfor og opløst orthofosfat fra et drænet areal i LOOP 1 på Lolland**

<i>Mark</i>	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98
<i>ST 106</i>									
Afstrømning (mm)	21	116	45	46	244	177	2,6	25,8	55,5
Total P (kg P/ha)	0,052	0,208	0,080	0,103	0,486	0,297	0,002	0,053	0,116
Opløst P (kg P/ha)	0,052	0,208	0,086	0,079	0,408	0,261	0,002	0,048	0,107

#### *Fosforudvaskning via drænen i lavbundsgrunde*

Med hensyn til fosforudvaskning udgør dyrkede og drænedes lavbundsområder et område af særlig interesse, da disse grunde adskiller sig fra mineraljordene både, hvad angår hydrologi og fosforbinding og -omsætning.

Udvaskning af fosfor fra drænedes tørvegrunde i omdrift kan være høj. Således fandt Hansen et al. (1990), at der blev udvasket 0,9 – 7,0 kg fosfor pr. ha pr. år med drænvandet fra tre lokaliteter.

Information om udvaskning af fosfor fra vedvarende græsningsarealer på drænet tørvejord er meget sparsom. Fra Gjærn å systemet foreligger målinger foretaget i årene 1993-1995 fra to lokaliteter, der viser, at koncentrationen af fosfor i drænen ligger i intervallet 0,053-0,250 mg fosfor pr. liter for det ene område, og i intervallet 0,090 – 0,320 mg fosfor pr. liter for det andet område. Den gennemsnitlige koncentration af total-fosfor i drænen fra de to arealer er henholdsvis 0,085 og 0,133 mg fosfor pr. liter. Ved anvendelse af nettonedbøren for 1994 på 458 mm på de to arealer fås en udvaskning via drænen på henholdsvis 0,39 kg fosfor pr. ha og 0,61 kg fosfor pr. ha. Direkte gødnings-

afsætning på græssede, dræned lavbundsarealer kan være et yderligere risikomoment (Magid et al., 1999).

En oplandsundersøgelse af udvaskningen af fosfor med dræn fra dræned vedvarende græsarealer på tørvejord, der ikke gødes, men afgræsses, viser, at udledningen af fosfor til vandmiljøet varierer betydeligt (Hoffmann & Ovesen, 2003). Ved Fussingø er to vedvarende græsningsarealer på tørvebund undersøgt. Det ene areal (50 ha skov og 59 ha eng) havde en udvaskning på 0,67 kg fosfor pr. ha pr. år (tre års gennemsnit) til det nærliggende vandløb, mens udvaskningen fra det andet område (122 ha lavbund, 70 ha landbrug, 95 ha skov heraf 28 ha på lavbund) lå på 0,92 kg fosfor pr. ha pr. år (tre års gennemsnit). I sidstnævnte tilfælde tydede både jordbundsforholdene samt drænvandets og grundvandets fosforindhold på, at udvaskningen fra det dræned og græssede lavbundsareal var dominerende, hvilket reelt betyder, at udvaskningen fra lavbundsarealet lå mellem 1,3 og 3,0 kg fosfor pr. ha pr. år.

#### *Fosforudvaskning fra rodzonen målt med teflonsugeceller*

Vores kendskab til udvaskning af fosfor fra rodzonen under danske forhold stammer som nævnt overvejende fra målinger på i alt 31 marker i 5 landovervågningsoplande i NOVA programmet. Resultaterne fra de 27 marker er vist i tabel 3.9. Fosforudvaskningen er generelt lille fra de 27 marker. Fosforudvaskningen er generelt størst fra sandjord og mindst fra lerjord.

Vand udtaget med teflonsugeceller (tabel 3.13 og 3.14) er analyseret. Fosforanalyser af vand udtaget med keramiske sugeceller er også rapporteret af Simmelsgård (1996), men disse fosformålinger anses for at være fejlbehæftede, da fosfor bindes til de keramiske sugeceller (Hansen et al., 1991). Fem marker skiller sig markant ud i datamaterialet (tabel 3.14). Fosforudvaskningen fra de fem marker er enten stor i hele perioden som ved St 106, hvor fosfortallet i jorden er meget høj (Pt = 10,7). Det kan også skyldes en meget stor tilførsel af fosfor i husdyrgødning givet på en gang som ved St 607, der blev tilført 155 kg fosfor pr. ha i et enkelt år, eller stor græsningsintensitet. Ompløjning af græs kan eventuelt også påvirke fosforudvaskningen som ved St 603 og St 607.

Ovenstående viser, at de fleste marker har en relativ lille fosforudvaskning, men ligeså klart er det, at nogle marker eller områder skiller sig ud som kritiske kildeområder, hvorfra der kan tabes væsentlige mængder P. Den forøgede fosforudvaskning i netop disse områder kan relateres til specielle gødsknings- og dyrkningsforhold. Det er dog meget muligt, at tilsvarende dyrknings- og gødningsforhold på andre marker ikke resulterer i tilsvarende høje tab, da vi ikke ved, hvordan specielle jordbundsforhold har spillet ind på de målte tab. Vi er derfor heller ikke i stand til at udpege risikområder for fosfortab via nedvaskning til dræn eller via underjordisk afstrømning. Fosfordrivning har sandsynligvis også en stor rumlig variation, og i det omfang det på sigt bliver muligt at udpege risikoområder for nedvaskning, vil man også for denne tabsvej kunne opnå større miljøeffekt ved at sætte ind med stor styrke netop i risikoområderne.

**Tabel 3.13 Gennemsnitlig årlig udvaskning af opløst orthofosfat fra rodzonen på to overordnede jordtyper. Der indgår målinger fra 15 marker på lerjord og 12 marker på sandjord med sugeceller i de beregnede gennemsnit. Bemærk, at der er beregnet for hydrologiske år (juni-maj)**

<i>Jordtype</i>	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98
<i>Sandjord</i>									
Tab (kg P/ha)	0,033	0,060	0,035	0,052	0,087	0,066	0,056	0,061	0,114
<i>Lerjord</i>									
Tab (kg P/ha)	0,051	0,036	0,035	0,025	0,050	0,057	0,007	0,027	0,022

**Tabel 3.14 Gennemsnitlig årlig udvaskning af opløst orthofosfat fra rodzonen på fem marker på ler- og sandjord, hvor fosforudvaskningen (kg P/ha) på et eller andet tidspunkt er konstateret at være meget stor**

<i>Marker</i>	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98
St 106 (ler)	0,523	1,482	1,064	0,15	1,504	1,004	0	0	1,39
St 301 (ler)	0,065	0,562	0,297	0,248	0,425	0,072	0,036	0,019	0,025
St 603 (sand)	0,030	0,059	0,056	0,071	0,118	0,083	0,021	0,106	1,814
St 604 (sand)	0,031	0,060	0,052	0,064	0,123	0,092	0,043	0,053	1,354
St 607 (sand)	0,027	0,063	0,058	1,362	1,975	0,288	0,194	1,192	0,371

#### *Fosforkoncentrationer i grundvand*

Fosforindholdet i det øvre grundvand måles i borer i dybderne 1,5 m, 3 m og 5 m under ca. 36 marker i de 5 Landovervågningsoplande i NOVA programmet. Mediankoncentrationen af opløst orthofosfat er vist for det øvre grundvand i de lerede og de sandede oplande i tabel 3.15. Der er generelt tale om lave koncentrationer af opløst uorganisk fosfor i det øvre grundvand. At koncentrationen er størst i 5 m dybde på sandjord, tilskrives naturlige geologiske forhold og ikke dyrkningspåvirkning.

**Tabel 3.15 Mediankoncentration af opløst orthofosfat i øvre grundvand i perioden 1990-2001 i 3 lerjordsoplande og 2 sandjordsoplande i NOVA programmet**

<i>Dybde under terræn</i>	<i>Lerede oplande</i>	<i>Sandede oplande</i>
1,5 m	0,017 mg P/l	< 0,01 mg P/l
3 m	0,009 mg P/l	< 0,01 mg P/l
5 m	0,007 mg P/l	0,02 mg P/l

#### **3.4.8 Fosforbidrag fra dybereliggende grundvand**

I dybere, reduceret grundvand kan der forekomme naturligt høje koncentrationer af opløst orthofosfat (Kronvang et al., 2001). Indhold over 0,1 mg fosfor pr. liter er således konstateret i mange borer (Refsgaard et al., 2002). En del af dette fosfor kan eventuelt blive bundet til ådalsaflejringerne eller sedimentet under vandløbsbunden ved tilstrømningen fra grundvandsmagasinerne til

vandløb og søer. Hvor stor betydning tilstrømning af fosforholdigt reduceret grundvand har som bidragsyder til fosfor i overfladevand vides ikke. Denne usikkerhed påvirker også sikkerheden i fastsættelsen af dyrkningsbidraget.

### **3.4.9 Samspil mellem tabsprocesserne på landbrugsarealer**

På mark- og oplandsniveau fordeler nettonedbøren sig på overflade- og overfladenær afstrømning samt nedsivning til grundvandet. Overfladenær afstrømning omfatter således også dræning, som sammen med overfladeafstrømning og erosion er afgørende for det direkte fosfortab til overfladevand.

En afstrømningshændelse opstår, når ledningsevnen for den nedadgående vandtransport i jordprofilen er begrænset. Dette kan medføre en lokal hævnning af vandspejlet (perched water table) med overfladenær mættet afstrømning som følge. Et typisk eksempel er de dræned morænejorde i Danmark. Derimod forårsages overfladeafstrømning af begrænset vandinfiltration umiddelbart på jordoverfladen. Under danske forhold er årsager til begrænset infiltration typisk en fuldstændig vandmætning af overjorden, frossen jord og jordpakning. En pløjesål fremmer således vandmætningen af pløjelaget og risiko for overfladeafstrømning. Den relative betydning for vandtransporten af overflade- og overfladenær afstrømning afhænger af jordbundsforhold, klima, topografi og dyrkningsforanstaltninger og varierer stærkt. Mens der ikke foreligger målte data fra Danmark, citerer Stamm (2003) eksempler fra Norden, hvor overflade- og overfladenær afstrømning (dræning) kan udgøre mellem 5 og 50% af den totale nedbør på dyrket areal.

Erosionsbegrænsende tiltag sigter mod at forøge vandinfiltration og dermed reducere overfladeafstrømningen. Herved kan også omfanget af overfladenær afstrømning stige (se f.eks. Sharpley & Smith, 1994). Ligeledes vil kunstig dræning sænke vandspejlet i dyrkningslaget og kan derfor under nogle forhold reducere overfladeafstrømning ganske betydeligt (Robinson & Rycroft, 1999; Turtola & Paajanen, 1995). En beskrivelse af fosfortabet kræver derfor ikke alene kendskab til betydningen af de relevante afstrømningsprocesser, men også til samspillet mellem vandtransporten og den rumlige og tidlige fordeling af mobile fosforpuljer i jordprofilen. Derfor kan der ikke generelt siges, hvilken relative fordeling af afstrømningsprocesserne, der udgør den mindste risiko for fosfortab. Dræning koblet med makroporetransport af opløst fosfor stammende fra planterester og gødning på jordoverfladen eller af partikelbundet fosfor kan i nogle tilfælde udgøre en lige så stor tabsrisiko som overfladeafstrømning (f.eks. Gaynor & Findlay, 1995; Turtola & Paajanen, 1995).

### **3.4.10 Andre bidrag, herunder regnvandsbetinget udledning fra befæstede arealer**

I mange landbrugsområder findes der også et større eller mindre antal punktkilder, såsom dambrug, industri og renseanlæg. Den præcision, hvormed fosforbidraget fra disse kilder bestemmes, har stor betydning for det diffuse landbrugsmæssige bidrags størrelse, da det landbrugsmæssige bidrag fastsættes som en difference mellem det målte totale tab og målinger og estimater af bidrag fra punktkilder, baggrundsbidrag og evt. retention.

Skulle en større eller mindre punktkilde i et landbrugsområde blive overset, vil bidraget fra denne tilskrives det diffuse tab fra landbrugsarealer. Det er vigtigt, at man til stadighed er opmærksom på

at identificere og eventuelt gribe ind over for mulige oversete punktkilder og direkte udledninger fra landbruget såvel som fra det øvrige samfund, da der som regel vil være hurtig og god effekt ved at begrænse tab herfra, hvorimod det egentlige diffuse tab er langt vanskeligere at nedsætte.

I det åbne land vil der også udledes fosfor til ferskvand med regnen, der strømmer af fra veje og andre befæstede arealer i byer. En del af disse vil være kloakerede og dermed indgå i den årlige opgørelse af de regnvandsbetingede udløb (Miljøstyrelsen, 2002). I 2001 er det beregnet, at der i alt blev udledt 177 tons fosfor fra regnvandsbetingede udløb fra områder tilsluttet kloaknet. De 177 tons fordeler sig med 102 tons fosfor fra overløbsbygværker og 75 tons fosfor fra separatudløb. De største udledninger er centreret om større byer. I det åbne land vil udledningen af fosfor fra befæstede arealer (separat udløb) og befæstede arealer uden kloakering således være af meget lille betydning, da der alt andet lige er tale om en meget lille andel af det samlede areal.

### **3.5 Tilbageholdelse/forsinkelse af fosfor fra mark til hav**

*Brian Kronvang og Gitte Holton Rubæk*

Fosfor tilbageholdes permanent eller over kortere eller længere tidshorisonter fra det tilføres jorden som gødning og hele vejen ud, til det ender i havet.

I alle miljøer kan fosfor, der tidligere er blevet tilbageholdt sammen med jordpartikler eller optaget i biomassen, igen blive frigjort på opløst form ved en lang række processer (mineralisering, ændring fra iltrige til iltfattige reducerende forhold f.eks. ved permanent vandmætning af jord; udfrysning af fosfor fra plantemateriale). Ligeledes kan fosfor, der transporteres væk fra pløjelaget som partikulært fosfor, standses eller forsinkes ved forskellige barrierer på vejen fra pløjelaget til havet.

Fosfor tilført vandløbssystemerne fra andre kilder som f.eks. spildevandsudledninger, lagres og forsinkes også i vandløbssystemerne, og denne pulje af tilbageholdte næringsstoffer vil også i tiden fremover have betydning for vandkvaliteten i specielt danske søer og fjorde.

Størrelsen af tilbageholdte puljer af fosfor i vandløbssystemerne varierer naturligvis betydeligt fra sted til sted alt efter, hvor belastede de er og navnlig har været af tidligere tiders udledninger af hus- og industrispildevand. Bynære søer vil f.eks. ofte være belastet med store puljer af fosfor, der stammer fra tidligere tiders udledninger. Betydningen af det tilbageholdte fosfor for vandkvaliteten i vandløb, søer og fjorde er behandlet mere indgående af Nielsen et al. (2003; 2004) .

#### **3.5.1 Tilbageholdelse af fosfor på vejen fra pløjelag til vandløb/sø/fjord**

Der findes jordlag, hvor de fysisk-kemiske forhold betinger, at større mængder fosfor er at finde i opløst form i jordvæsken (høje mætningsgrader i pløjelaget, reducerende forhold). Strømmer vandet igennem en sådan zone, kan det opløste fosfor transporteres ud af zonen. Når det opløste fosfor er transporteret ud af denne zone, er det dog meget sandsynligt, at de fysisk-kemiske forhold i de nye omgivelser igen betinger en binding eller udfældning som fast stof, og dermed standses eller forsinkes den videre transport af fosforet. Således opfanges og tilbageholdes opløst uorganisk fosfor, der nedvaskes fra pløjelaget, igen i dybere jordlag, såfremt underjorden har tilstrækkelig ledig bindingskapacitet. Planternes optagelse af fosfor i underjorden betragtes for det meste som værende

beskeden, men over længere tidshorisonter vil specielt afgrøder med et veludviklet dybtgående rodnet i et vist omfang kunne udnytte underjordens fosfor, hvorved det kan eksporteres fra jorden eller returneres til pløjelaget.

Kun en mindre del af det fosfor, der tabes fra pløjelaget på en mark ved vind- og vanderosion og overfladeafstrømning, når frem til vandløbssystemet, resten vil aflejres ved naturlige og kulturbetingede barrierer i landskabet, såsom skove, hegn, veje m.m. eller, når der er tale om vanderosion, blot der hvor marken flader ud igen. Sådanne barrierer i landskabet, som ikke er i umiddelbar nærhed af vandløbssystemet, har den fordel, at det fosfor, der tilbageholdes her, må anses for at være sikret en mere permanent tilbageholdelse end fosfor, der opfanges i vandløbsnære barrierer.

### **3.5.2 Betydning af ripariske bufferzoner for tilbageholdelse af fosfor fra landbrugsarealer**

Igennem mange år har der internationalt været fokus på betydningen af ripariske bufferzoner for tilbageholdelse af fosfor leveret med overfladeafstrømning fra tilstødende landbrugsarealer (se f.eks. Dillaha & Inamdar, 1997). Etablering af ripariske bufferzoner er en foranstaltning med umiddelbar virkning, som i mange lande har været både testet og anvendt til at reducere fosfortabet med overfladisk afstrømning fra skrånende marker til overfladevand.

Jordbearbejdning og dyrkning af afgrøder, der giver et spredt plantedække i perioder med megen og intensiv nedbør eller tøbrud, kan nemlig medføre et større eller mindre omfang af jorderosion på marken. Endelig kan der ved vandmætning af jorden eller ved tøprocesser forekomme overfladisk afstrømning uden synlig erosion af jorden. Herved kan opløst fosfor også blive frigivet fra jorden eller fra planter og plantedele på marken. I alle tilfælde vil vandet med den mobiliserede jord og indholdet af opløste fosforforbindelser blive transporteret fra marken og ned mod lavninger i terrænet. Hvis der i lavningen er en grøft, et vandløb, en dam eller en sø, vil hele eller dele af fosforet i det overfladisk afstrømmende vand løbe ud over kanten og ned i overfladevandet.

Dyrkes der tæt til eller helt ud til overfladevandet, vil modstanden mod vandets strømning kun være begrænset af de topografiske forhold på marken, mikrorelieffet omkring kanten og afgrøden. Hvis vandet støder på en permanent vegetationsdækket zone, vil modstanden mod vandets strømning øges, transportkapaciteten vil blive nedsat, og der vil kunne ske en aflejring af jordpartikler både på marken før bufferzonen og i selve bufferzonen. Det permanente vegetationsdække vil også kunne virke som et filter for partikler og via et veludviklet rodnet give jorden en bedre struktur og dermed en større infiltrationskapacitet (Dillaha et al., 1989). Det sidste medvirker både til at mindske transportkapaciteten og til, at opløste fosforforbindelser ved infiltration af jorden kan blive bundet til frie bindingsflader, for eventuelt senere at blive optaget i vegetationen.

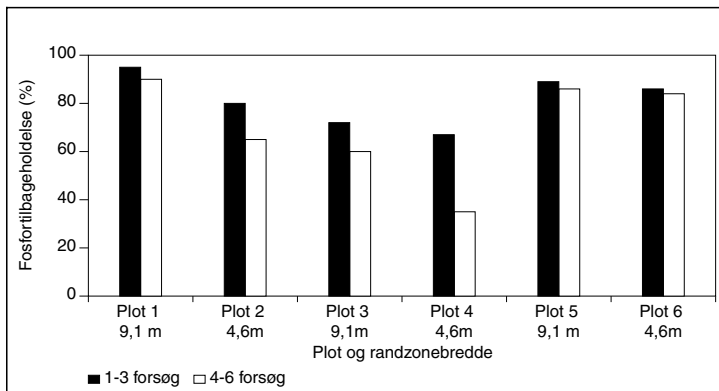
#### *Kvantitative erfaringer fra kontrollerede plotforsøg*

I litteraturen er der fundet flere eksempler fra plotforsøg med bufferzoner (tabel 3.16). På nær ét forsøg viser de alle, at 5 - 10 m brede bufferzoner tilbageholder en stor andel af de tilførte fosformængder fra overfladisk afstrømning i plottet. På grund af de meget forskellige forsøgsbetingelser (tidsrum, tab af fosfor, afstrømning mv.) kan man ikke lave en direkte sammenligning mellem resultaterne fra forsøg til forsøg. Alle forsøg undtaget ét viser dog en relativ stor tilbageholdelse af to-

total-fosfor selv ved bufferzoner af 4 - 5 m bredde (41 - 97%). Ved en fordobling af bredden i de enkelte forsøg øges tilbageholdelsen af total-fosfor i de fleste tilfælde kun lidt (0 - 32%) (tabel 3.16). De eksperimentelle forsøg påviser derfor, at selv smalle bufferzoner er i stand til at tilbageholde store mængder total-fosfor leveret fra skrånende marker med overfladisk afstrømning.

De fleste plottforsøg er gennemført over korte tidsrum, men med relativt store mobiliseringer af fosfor fra plottet. Forsøg fra Finland og Norge viser dog, at selv over længere tidsrum (op til 7 år) bibeholdt bufferzonen evnen til at tilbageholde total-fosfor. Forsøgene fra Finland er gennemført ved normalt klima og dermed med normale årlige mobiliseringer og transport af fosfor fra plottet. De danske forsøg med 2 og 6 m bræmmer er gennemført ved relativt lave mobiliseringer af total-fosfor fra plottet. Det er måske en af grundene til den forholdsvis store tilbageholdelse, der er konstateret i selv en 2 m bufferzone.

Dillaha et al. (1989) gennemførte deres forsøg ved overrisling med regnsimulator på 5,5 x 18,3 m store plots. Regnsimulering blev gennemført ad to omgange med 4 - 5 dages mellemrum. I alt blev der simuleret med 200 mm nedbør på hvert plot. De fandt, at der for total-fosfor skete en lille reduktion i tilbageholdelsesprocent mellem deres to forsøgsrunder (figur 3.16). De argumenterer for, at dette skyldes, at der opkoncentreres sediment i bufferzonen (opfyldning).



**Figur 3.16** Gentagne forsøg med regnsimulering på markplot og tilbageholdelse af total-fosfor i bufferzoner af forskellig bredde (fra Dillaha et al., 1989).

**Tabel 3.16 Oversigt over resultater fra forsøg med bufferzoner af forskellig bredde fra den internationale litteratur**

Referencer	Land	Periode	Bredde, m	Total-P, tab Kg P/ha	Opløst, uorg. P, tab Kg P/ha	Total-P effektivitet, %	Opløst uorg. P effektivitet, %
Uusi-Kämpmä et al. 1992, 1996	Fin	7 år	10	0,89	0,14	38	14
Uusi-Kämpmä et al. 1992, 1996	Fin	7 år	10	0,89	0,14	27	-64
Syversen, 1996, 1997	Nor	7 år	5	0,72		88	
Syversen, 1996, 1997	Nor	7 år	10	0,72		96	
Syversen, 1994	Nor	enkelt	5			66	
Syversen, 1994	Nor	enkelt	10			67	
Syversen, 1994	Nor	enkelt	5			51	
Syversen, 1994	Nor	enkelt	10			82	
Syversen, 1994	Nor	enkelt	5			75	
Syversen, 1994	Nor	enkelt	10			82	
Syversen, 1994	Nor	enkelt	5			97	
Syversen, 1994	Nor	enkelt	10			96	
Vought et al., 1991	Sve	enkelt	8				66
Vought et al., 1991	Sve	enkelt	16				95
Ulen, 1988	Sve	3 år	5	0,57	0,24	-36	-33
Nielsen & Hansen, 1993	Dan	4 år	2	0,034		65	
Nielsen & Hansen, 1993	Dan	4 år	6	0,034		97	
Dillaha et al., 1989	USA	1 uge	9,1	4,34	0,09	93	47
Dillaha et al., 1989	USA	1 uge	4,6	4,34	0,09	73	-83
Dillaha et al., 1989	USA	1 uge	9,1	8,42	0,11	65	-31
Dillaha et al., 1989	USA	1 uge	4,6	8,42	0,11	49	8
Dillaha et al., 1989	USA	1 uge	9,1	2,27	0,05	87	48
Dillaha et al., 1989	USA	enkelt	4,6	2,27	0,05	85	69
Young et al., 1980	USA	enkelt	27,43	27,7	6,29	88	77
Young et al., 1980	USA	enkelt	27,43	27,7	6,29	81	42
Lee et al., 1989	USA	enkelt	4,6	2,23	0,011	53	54
Lee et al., 1989	USA	enkelt	9,1	2,23	0,011	78	-237
Magette et al., 1987	USA	enkelt	4,6			41	
Magette et al., 1987	USA	enkelt	9,1			53	

I tabel 3.16 er der for flere af de gennemførte simuleringer også målt tilbageholdelse af opløst orthofosfat i bufferzoner. Men resultaterne er mere usikre end for total-fosfor. I en tredjedel af de gennemførte forsøg frigives der netto opløst fosfor under eksperimentet (tabel 3.16). De gentagne forsøg af Dillaha et al. (1989) viser også tydeligt problemet med opløst fosfat, idet antallet af plot med en nettofrigivelse af opløst fosfat øges fra 1 til 3 plot ved anden runde regnesimuleringer.

#### *Kvalitative erfaringer fra Danmark*

Erosionsforhold og forhold omkring deponering af sediment på mark, i bufferzone og udløb til vandløb, blev visuelt registreret i det tidlige forår (marts) efter tre vinterperioder på et større antal skrånende marker beliggende på forskellige jordtyper i Danmark. Alle markerne stødte op til grøfter eller vandløb med en udyrket bufferzone. Bufferzonernes bredde blev opmålt i efteråret 1998.

Den visuelle registrering af forekomst af større riller (slutareal større end en knytneve) og mindre riller blev foretaget ved 3-4 gennemgange af marken, dels midt på det stejleste sted, dels ved bunden af hældningen, dels langs og i bufferzonen. I forbindelse med gennemgangen blev der anvendt et standard skema til registreringen af riller, deponering og udløb til vandløb. I tabel 3.17 er vist ho-



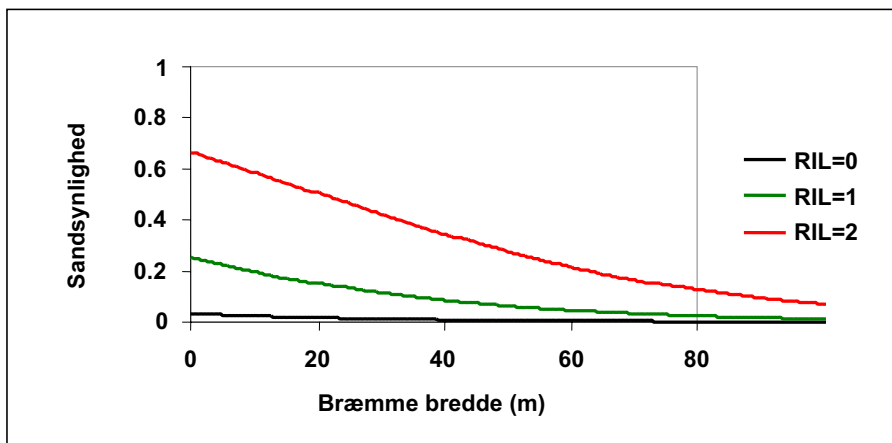
vedresultater fra den visuelle gennemgang af markerne i tre vinterperioder med hensyn til forekomst af riller, sandaflejring på mark, deponering i bufferzoner og gennembrud af bufferzoner.

**Tabel 3.17 Registrering af forekomst af riller, sandaflejringer på mark før bufferzone, aflejring i bufferzone, udløb til vandløb og andre former for udløb til vandløb igennem tre vinterperioder i Danmark på 138-146 skrånende marker (slope units) (Kronvang et al., 2005)**

År	N	Store riller		Små riller		Sandaflejring på mark op til bufferzone		Aflejring i bufferzone		Udløb til vandløb gennem bufferzone		Andre udløb
		Ja	Nej	Ja	Nej	Ja	Nej	Ja	Nej	Ja	Nej	
1998/1999	138	20%	80%	67%	33%	63%	37%	31%	69%	23%	77%	-
1999/2000	139	29%	71%	62%	38%	57%	43%	31%	69%	17%	83%	39%
2000/2001	146	34%	66%	58%	42%	55%	45%	29%	71%	25%	75%	36%

Af tabel 3.17 ses det, at store riller forekom på 20-34% af markerne. Små riller fandtes derimod på 58 - 67% af markerne oftest i form af småriller i kørespor. Aflejring af sandfaner på mark umiddelbart før bræmmer blev registreret på 55 - 63% af markerne. Aflejring i den eksisterende bufferzone langs marken blev registreret på 29 - 31% af markerne. Endelig blev der fra 17 - 25% af markerne mindst et sted registreret udløb fra mark gennem bufferzone til vandløb. Den visuelle registrering viser således, at de eksisterende bufferzoner ser ud til at have en vis effekt for tilbageholdelse af jord og dermed også partikulært fosfor fra marken. Denne konklusion bygger på antagelsen om, at uden bufferzone ville jord blive ført videre ud til vandløb i samme antal tilfælde, som der er registreret sandfaner, der støder op til bufferzoner. I de sidste to vintre blev andre tilfælde af udløb til vandløb fra mark også systematisk registreret. Det drejer sig oftest om udløb under jorden gennem gravede dyrehuller. Det ses, at der i mange tilfælde er registreret disse former for udløb til vandløb i mindst et tilfælde på hver mark. De underjordiske udløb finder kun sted ved bufferzoner af lille udstrækning (< 5 m).

Den deskriptive gennemgang af de visuelle observationer ovenfor er kvalitativ. Derfor er der gennemført en nærmere statistisk analyse af de visuelle observationer, hvor sandaflejring støder op til bufferzoner, aflejring i bufferzoner og udløb til vandløb. Den statistiske analyse omfatter en logistisk regressionsanalyse for gennembrud af bufferzoner på de undersøgte marker ved forskellige størrelser af riller på marken. I alt indgik der i analysen 394 observationer. Forklaringsgraden var 41% for den opstillede logistiske regressionsmodel. Betydningen af den opstillede model for de forskellige erosionsforhold på marken er vist i figur 3.17. Den opstillede model gælder selvsagt kun for sandsynligheden for gennembrud af bufferzonen med sediment og partikelbundet fosfor. Modellen kan således ikke anvendes til at forudsige, hvad der sker med en eventuel tilførsel af opløst fosfor med overfladisk afstrømmende vand, der når frem til overfladevand gennem en bufferzone.

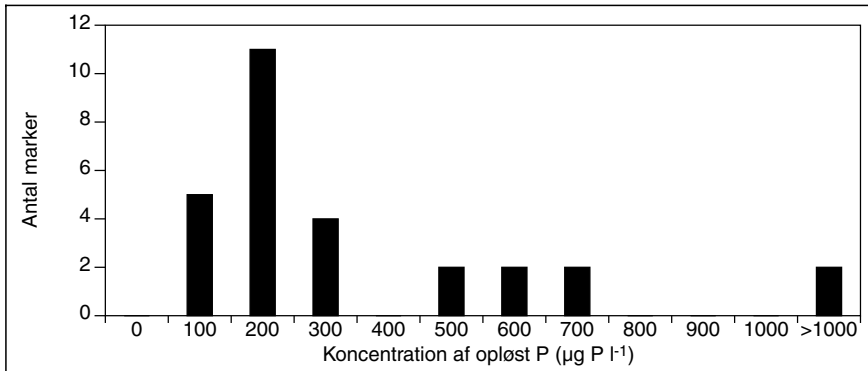


**Figur 3.17 Sandsynlighed for tilførsel af sediment til vandløb fra skrånende marker ved jorderosion og overfladisk afstrømning ved forskellig rillestørrelse og bredde af bufferzone (bræmme). RIL=0: Ingen synlige riller på marken før bufferzone; RIL=1: Små riller på mark før bufferzone; RIL=2: Større riller (knytnæve store) synlige på marken før bufferzone (Kronvang et al., 2003).**

Som forventet viser modellen, at når der ikke er synlige riller på marken, vil sandsynligheden for tilførsel af sediment og partikulært fosfor til overfladevand være næsten nul uanset bredden. Ved forekomst af små riller vil der ved en 2 meter bræmme være mindre end 25% sandsynlighed for gennembrud af sediment til overfladevand. Ved store riller vil sandsynligheden for gennembrud af en 2 meter bræmme øges til 65%. Ved en 20 meter bufferzone vil der ved små riller være 15% sandsynlighed for gennembrud, mens sandsynligheden ved store riller er på 50%. Ved forekomst af store riller på marker skal bufferzonen derfor være mere end 20 meter bred for, at gennembrud kun sker et ud af to steder. Skal sandsynligheden for gennembrud være under 20%, skal bufferzonen ved store riller være op mod 80 meter bred.

#### *Tab af opløst fosfor med overfladisk afstrømning til overfladevand*

Ved overfladisk afstrømning fra marker til vandløb kan partikulært fosfor blive aflejret på mark og i bufferzone. Derimod kan opløst fosfor blive transporteret videre med vandet gennem bufferzone og ud i overfladevand. Et eksempel på koncentrationen af opløst fosfor i overfladisk afstrømmende vand er fra en prøvetagningsrunde i det tidlige marts 1999, hvor overfladisk afstrømning til vandløb var til stede på 28 marker (figur 3.18). Koncentrationen af opløst fosfor dækkede over et meget bredt interval med den maksimale koncentration på over 10 mg fosfor pr. liter. Median koncentrationen af opløst fosfor blev målt til 0,180 mg fosfor pr. liter fra de 28 marker. Andre undersøgelser i Danmark af jorderosion og overfladisk afstrømning har konstateret tilsvarende høje koncentrationer af opløst fosfor (Hasholt et al., 1990). Også mange udenlandske undersøgelser har dokumenteret, at koncentrationen af opløst fosfor kan være meget høj i overfladisk afstrømning fra marker (f.eks. Sharpley & Rekolainen, 1997).



**Figur 3.18 Koncentrationen af opløst fosfor målt i overfladisk vand, der strømmer fra bræmme til vandløb i foråret 1999 fra 28 marker i Danmark.**

### 3.5.3 Tilbageholdelse af fosfor i vandløbssystemet

I vandløb, søer og på oversvømmede enge sker der en sorption og et biologisk optag af opløst fosfat og en sedimentation af partikelbundet fosfor. En del af det tilførte fosfor fra diffuse kilder og punktkilder kan ved de forskellige processer blive både midlertidigt og mere permanent tilbageholdt i vandløbssystemet under dets transport mod havet. Om der er tale om en midlertidig eller permanent tilbageholdelse afhænger i høj grad af, hvor og hvornår processerne foregår i vandløbssystemet. I vandløbet er der oftest tale om en sæsonbetonet tilbageholdelse af fosfor, og i søer og på oversvømmede arealer en mere permanent tilbageholdelse.

#### *Vandløb*

I vandløb sker der ingen permanent tilbageholdelse af fosfor. Der sker en midlertidig tilbageholdelse af fosfor i plantebiomassen i vandløbet i løbet af vækstsæsonen. Der foregår også en fysisk sedimentation af fosfor på vandløbsbunden i perioder med faldende og lille vandføring. Denne sedimentation af fosforholdigt slam kan foregå over hele året, men ved høje vandføringer spules vandløbsbunden igen ren for slam. Endelig sker der i vandløbet en løbende transformation af fosfor mellem opløste og partikelbundne faser via det biologiske optag, mineralisering og fysisk/kemiske sorptions- og desorptionsprocesser.

I mange vandløb sker der en sorption af opløst fosfat til jern- og aluminiumoxider og hydroxider. Mange danske vandløb har forholdsvis høje koncentrationer af total-jern, som skyldes tilførslen af ferro-jern ( $\text{Fe}^{2+}$ ) forbindelser fra indstrømmende reduceret grundvand, eller fra dræn, som afvander okkerpotentielle jorder. I vandløbet oxideres ferro-jern ( $\text{Fe}^{2+}$ ) til ferrijern ( $\text{Fe}^{3+}$ ), som fælder ud som okkerpartikler på vandløbsbunden. Opløst fosfat vil i stort omfang bindes til okkerpartiklerne, og på denne måde blive udfældet på vandløbsbunden. I mange vest- og sønderjyske vandløb er koncentrationen af opløst fosfat derfor meget lav (Svendson & Kronvang, 1995). Det opløste fosfat er blevet omdannet til partikelbundet uorganisk fosfor, som lettere kan tilbageholdes i vandløbssystemets søer og oversvømmede engarealer. Omvendt kan man sige, at koncentrationen af opløst fosfor i et vandløb kun vil give et minimumsbud på tilførslen af opløst fosfor til vandløbet, da fosfor tilført på

opløst form vil kunne bindes partikulært, inden vandprøven udtages og måles. En sådan situation vil være typisk specielt i okkerholdige vandløb.

I vandløbet sker der fra foråret en opvækst af højere planter (makrofyter). Planterne optager fosfor fra vandet eller sedimentet i vandløbet under deres fotosyntese og udvikling af biomasse. Ved det biologiske optag af opløst fosfat omdannes det til organisk bundet fosfor, der i vækstperioden midlertidigt tilbageholdes i vandløbssystemet. Der sker dog løbende i vækstperioden en frigivelse af fosfor ved planternes respiration og tab af plantedele ved fysisk slid.

Planterne har deres biomasse maksimum i det tidlige efterår, hvorfor den tilbageholdte pulje af fosfor er størst på dette tidspunkt. Ved planternes hændelse i efterår og vinter frigives eller transporteres fosfor videre gennem vandløbssystemet med de døde plantedele. Der findes kun få undersøgelser over makrofyternes biomasse i danske vandløb. Undersøgelser i 6 små og mellemstore vandløb viste en gennemsnitlig maksimal biomasse på 200 - 300 g tørvægt pr. m<sup>2</sup> vandløbsbund (Thyssen et al., 1990). Ved et fosforindhold på 0,57 - 2,3 g fosfor pr. m<sup>2</sup> vandløbsbund med ovenstående biomasse vil der i løbet af vækstsæsonen blive optaget en del fosfor. Makrofyter findes dog ikke i alle danske vandløb. I de små vandløb findes der mange gange ikke makrofyter på grund af beskygningen fra brinkvegetationen. Et overslag over betydningen af fosforophobningen i makrofyter i danske vandløb kan laves ud fra en antagelse af, at halvdelen af de mindre vandløb og alle større vandløb har en vækst af makrofyter. Ved maksimal biomasse vil der i sensommeren være indbygget i størrelsesordenen 80 - 300 tons fosfor i makrofyterne. I mange større vandløb skæres der grøde en eller flere gange i vækstsæsonen. Oftest opsamles den afskårne grøde, der efterfølgende udbringes på nærved liggende landbrugsarealer. Herved fjernes fosfor permanent fra vandløbssystemet. Der findes ingen oplysninger om mængden af opsamlet grøde fra vandløb. Fjernelsen af fosfor fra vandløbssystemet ved grødeskæring og efterfølgende opsamling vurderes dog højst at udgøre i størrelsesordenen 100 tons fosfor pr. år.

De bentske alger har deres maksimum i biomasse i det sene forår. De bentske alger omsættes dog meget hurtigt (dage). Fosforoptaget i bentske alger har derfor kun kortvarig betydning for fosfortilbageholdelse og transformation af fosfor i vandløb.

Sedimentationen af fosforholdigt slam på vandløbsbunden er en kombination af partikler som udfældes, biologisk optag og kemisk sorption. Undersøgelser i en række danske vandløb har vist, at der i sommerperioden kan være opsamlet 3 - 8 g fosfor pr. m<sup>2</sup> vandløbsbund (Kronvang et al., 1999). Ved store vandføringer i efterår og vinter spules vandløbsbunden igen ren for det fosforholdige slam. Derfor er der generelt set ikke tale om en permanent tilbageholdelse af fosfor i vandløb. Undtagelsen herfra er dog tilbageholdelse af fosfor i steder med strømlæ og permanent vegetation i randzoner af mellemstore og store vandløb. Her kan fosfor blive tilbageholdt i flere år indtil meget store vandføringer indtræffer eller ved, at vandløbet begynder at erodere og flytte sit leje. Betydningen af denne mere permanente tilbageholdelse i danske vandløb er ikke opgjort. Et forsigtigt skøn over betydningen heraf kan baseres på, at 5% af de 16.300 km mellemstore og store danske vandløb er randzoner. Her vil i givet fald for en længere årrække kunne tilbageholdes i størrelsesordenen 20 - 30 tons fosfor pr. år.

## *Søer*

Søer er fra naturens hånd en nettofælde for fosfor – dvs. søen fyldes løbende op med minerogent og biologisk materiale, der indeholder fosfor. Det betyder, at søer, som er i ligevægt, vil tilbageholde en del af det indkommende fosfor. Nettotilbageholdelsen er især afhængig af søens opholdstid for det tilstrømmende vand fra oplandet. En mekanisme, som dog ofte omtales, er nettofrigivelsen af fosfor fra søbundens fosfordepoter, som forsinker søernes kemiske og biologiske reaktion på en reduktion af den eksterne fosfortilførsel (Kronvang et al., 2001). At fosfor frigives fra søsedimentet er en naturligt forekommende proces i søernes bundvand, men processen er i nogle danske søer speedet kraftigt op, da søerne ikke er i ligevægt. Processen kendes således især fra søer, som tidligere har modtaget store fosfortilførsler fra punktkilder. Efter reduktion af den eksterne fosfortilførsel til søen frigives der i sommerperioden store mængder fosfor fra søsedimentet til søens vandfase, der så indgår i algevæksten. Søbunden er blevet en nettokilde til fosfor. Er den opbyggede fosforpulje i søsedimentet meget stor, kan det tage mange år (> 10 år) inden fosforpuljen er nedbragt, så der igen er ligevægt mellem fosfor i søvandet og i søbunden. I andre søer er indsvindingstiden meget hurtig (< 10 år). Det betyder, at det er de historiske fosforbelastningsforhold og de biogeokemiske forhold i den enkelte sø, som er afgørende for, hvor hurtigt søen reagerer på en reduktion i den eksterne fosfortilførsel.

Søer i ligevægt tilbageholder fosfor, som indbygges permanent i sedimentet. Tilbageholdelsen af fosfor i søen vil være afhængig af vandets opholdstid i søen således, at tilbageholdelsen stiger med stigende opholdstid. Mange søer i Danmark er dog ikke i ligevægt, da de gennem mange år har været belastet med store mængder fosfor. Ved reduktion af den eksterne fosforbelastning vil disse søer frigive en del af det ophobede fosfor fra sedimentet til vandfasen. I en kortere eller længere periode vil søerne derfor kunne blive en nettokilde til fosfor, eller de vil have en nedsat permanent tilbageholdelse af fosfor (Jensen et al., 2001). Målinger af fosforbalancer gennemføres hvert år i 16 søer i det danske overvågningsprogram. I disse søer skete der en nettotilbageholdelse på i gennemsnit 0,33 g fosfor pr. m<sup>2</sup> søbund i perioden 1995 - 2000 (Jensen et al., 2001). Anvendes dette resultat på samtlige danske større søer, skete der en permanent tilbageholdelse på i størrelsesordenen 150 tons fosfor pr. år som gennemsnit i perioden 1995 - 2000. Hertil kan komme en fosfortilbageholdelse i mindre søer og damme.

## *Oversvømmede arealer*

Ved temporære oversvømmelser af ånære arealer sker der en sedimentation af partikelbundet fosfor på engarealet. Depositionen af partikelbundet fosfor på oversvømmede arealer er formentlig af mere permanent karakter på de temporært oversvømmede arealer. Ved mere permanent vanddække kan iltfrie forhold dog medføre en frigivelse af opløst fosfor, der kan udvaskes. Målinger ved en hyppigt oversvømmet lokalitet i Danmark har vist, at depositionen ved kortvarige oversvømmelser (3 - 12 dage) kan udgøre 1,2 - 11,8 g fosfor pr. m<sup>2</sup> oversvømmet areal (Kronvang et al., 1999). Oversvømmelser af ånære arealer er de fleste steder i Danmark helt forhindret eller mindsket i omfang på grund af dyrkningsinteresser, beboelser, mv. Hvor mange steder, og hvor hyppigt oversvømmelser foregår, er ikke opgjort i Danmark. Betydningen af den permanente tilbageholdelse af fosfor ved deposition på oversvømmede arealer kan derfor ikke opgøres for hele landet. På grund af de forholdsvis store tilbageholdelsesrater, der er målt under enkelte oversvømmelser, er der dog ingen

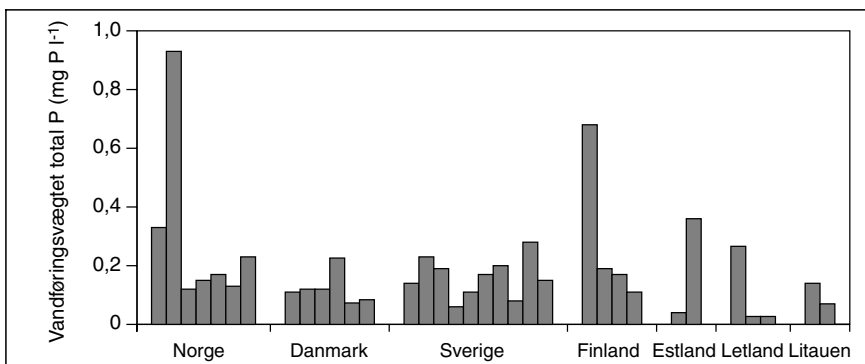
tvivl om, at oversvømmelser af ånære arealer i våde vintre kan medføre en betydelig permanent tilbageholdelse af fosfor. Hvis f.eks. bare 1.000 hektar engareal oversvømmes temporært i vinterperioden, vil det kunne betyde en permanent tilbageholdelse af partikelbundet fosfor på i størrelsesordenen 12 - 120 tons fosfor pr. år. Det er ikke muligt at give et tilsvarende bud på eventuel frigivelse eller tilbageholdelse af opløst fosfor.

### 3.6 Kvantificering af dyrkningsbidraget af fosfor til vandløb og søer

*Brian Kronvang og Gitte Holton Rubæk*

Dyrkningsbidraget af fosfor til ferskvand består, som beskrevet i afsnit 3.4, af en række enkelte tabsposter som jorderosion og overfladisk afstrømning, tab med drænvand, grundvand, brinkerosion, mv. Da der ikke findes målinger af alle de enkelte tabsposter, benytter vi ofte vandløbsmålinger til at beregne det samlede dyrkningsbidrag af fosfor fra et givet oplandsareal. Dyrkningsbidraget beregnes ud fra transporten af fosfor i vandløb ved at fratække et baggrundsbidrag og eventuelle fosforudledninger fra punktkildet i oplandet. Hertil skal i større vandløbssystemer også tillægges en eventuel tilbageholdelse af fosfor i søer, vådområder, mv.

En vurdering af, hvorvidt fosforkoncentration i et vandmiljø er kritisk, gøres individuelt for hver recipient: Er det f.eks. en fosforfølsom sø eller fjord, som i dag modtager en større fosforbelastning, end hvad der er acceptabelt i forhold til miljømålsætningen, som i dag findes i regionplanerne, men som i fremtiden vil blive væsentligt skærpet i forbindelse med implementeringen af Vandrammedirektivet. Så selv om gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentrationer af fosfor, der er målt i mindre danske landbrugsoplande i NOVA, er forholdsvis beskedne i forhold til de koncentrationer, man har fundet i nogle oplande i f.eks. Norge, Sverige og Finland (figur 3.19), er det ikke nødvendigvis et udtryk for en bedre miljøtilstand i de danske vandløb. De høje tab, der ses i enkelte norske og finske vandløb, skyldes, at der i disse oplande enten er en meget stor erosionsrisiko eller en stor andel af drænedede organiske jorde i oplandet.



**Figur 3.19 Sammenligning af gennemsnitlig årlig vandføringsvægtet koncentration af totalfosfor i vandløb, der afvander mindre landbrugsoplande (< 2500 ha) i de Nordiske og de Baltiske Lande. Data er fra en fem årig periode 1993 - 1997 og indsamlet i forbindelse med et projekt under Nordisk Ministerråd (Vagstad et al., 2001).**

### 3.6.1 Baggrund og anvendte metoder

I det nationale program til overvågning af vandmiljøet (NOVA) måles koncentrationen af fosfor i vandløb over hele landet. Ved målestationerne foregår der også en kontinuert overvågning af vandstanden og en måling af vandføring, der tilsammen danner baggrund for beregning af en døgnmiddel vandføring. Fosforkoncentrationen måles ved de fleste vandløbsstationer som stikprøver hver måned eller hver fjortende dag. Ved stikprøvetagning beregnes transporten, og dermed tabet af fosfor fra et givet vandløbsopland, ud fra den kendte døgnmiddel vandføring og de målte koncentrationer af fosfor under anvendelse af en beregningsmetode, der forudsætter en lineær udvikling af fosforkoncentrationen mellem prøvetagningsdatoer. Anvendelse af denne beregningsmetode har ved tidligere undersøgelser vist sig at undervurdere den årlige fosfortransport (Kronvang & Bruhn, 1996).

Det dyrkningsbetingede fosfortab til overfladevand beregnes i det nationale overvågningsprogram (NOVA) på 3 forskellige måder på baggrund af to forskellige stationsnet i overvågningen af vandløb:

- i. Havstationsnettet, som i NOVA 1998 - 2003 omfatter ca. 170 vandløbsstationer. Stationsnettet benyttes til opgørelser af fosfortilførsel til de marine områder på baggrund af målingerne i vandløb og målinger af fosforudledningen fra punktkilder som renseanlæg, industrier, dambrug og spredt bebyggelse. Fosforkoncentrationen måles ved stikprøvetagning.
- ii. Dyrket typeoplandsnet, som for fosfor i NOVA 1998 - 2003 omfatter 27 vandløb, der fortrinsvis afvander mindre, dyrkede vandløbsoplande, hvor der ikke er fosforudledninger fra større punktkilder. Fosforkoncentrationen måles ved stikprøvetagning.
- iii. I en delmængde af vandløbene i det dyrkede typeoplandsnet gennemføres der intensive (tids- og/eller flow-proportionale) målinger for at forbedre opgørelsen af dyrkningsbidraget af total-fosfor.

Når fosfortabet fra dyrkede arealer (dyrkningsbidraget) skal beregnes ud fra vandløbsmålinger, sker det altid ved anvendelse af en kildeopsplitning. Kildeopsplitning er anvendt i NOVA siden 1989 til at opgøre kilderne til kvælstof og fosfor i overfladevand. Beregningen indebærer en kvantificering af følgende bidrag:

$$T_P = P_P + B_P + D_P - R_P$$

Hvor

**T** = Transporten af total-fosfor (P) til kystvandene via vandløb.

**P** = udledning af total-fosfor fra Punktkilder (renseanlæg, særskilte industrier, dambrug, spredt bebyggelse og regnvandsbetingede udløb) til vandløb og søer.

**B** = Baggrundstab af total-fosfor fra hele landet minus de befæstede arealer og ferskvandsarealerne.

**D** = Dyrkningsbidraget af total-fosfor fra dyrkede arealer.

**R** = Retention dvs. tilbageholdelse af total-fosfor efter emission til vandløbssystemerne (hidtil kun omfattet beregning for tilbageholdelse i søer).

I ligningen kvantificeres **T**, **P**, **B** og **R** baseret på en kombination af målinger og beregninger hvert år. Dyrkningsbidraget (**D**) beregnes derefter som en residual ud fra ligningen:

$$D_P = T_P - P_P - B_P + R_P$$

Opgørelserne gennemføres på 2. ordens marine kystafsnit, som der er 49 af i Danmark. Der er usikkerheder forbundet med beregningen af hvert enkelt led i ligningen. Usikkerheden skyldes flere forhold.

**T**: Opgøres på baggrund af målinger i vandløb, som ”dækker” ca. halvdelen af landets areal. Den resterende halvdel opgøres ved ekstrapolation af et diffust tab det enkelte år fra en eller flere repræsentative målestationer og opgørelse af udledningen fra større punktkilder i det umålte areal. Usikkerheder er derfor knyttet både til de målte transporter af fosfor ved målestationerne og ved ekstrapolationen af det diffuse tab til de umålte arealer.

**P**: Omfatter udledningen af fosfor fra større punktkilder (renseanlæg > 30 PE, særskilte industrielle udledninger, udledninger fra ferskvandsdambrug, udledninger fra spredt bebyggelse og regnvandsbetingede udløb uden for kloakerede områder). Udledninger fra renseanlæg, særskilte industrielle udledninger og dambrug opgøres i vidt omfang baseret på udløbsmålinger, hvor antallet af årlige målinger øges med anlæggets størrelse. Udledninger fra spredt bebyggelse opgøres på baggrund af 3 vidensniveauer og baseres herefter på erfaringstal omkring spildevandsproduktion og renseseffektivitet (jævnfør afsnit 3.4.2). Opgørelse af udledninger fra overløbsbygværker og regnvandsbetingede udløb baseres på modelestimer eller erfaringstal. Der forventes at være størst usikkerhed ved opgørelse af udledninger fra spredt bebyggelse og regnvandsbetingede udløb.

**B**. Opgørelsen baseres på årlige målinger i 7 vandløb, der afvander små udyrkede skov- og naturoplande. Usikkerheden er især knyttet til den eventuelt manglende repræsentativitet af de 7 vandløbsoplande for baggrundsbidraget af fosfor til vandløbssystemerne og anvendelsen af opskaleringismetoder til hele landets areal minus befæstede og ferskvandsarealer. Der er hidtil anvendt arealkoefficienter ved opskaleringen. Som vist nedenfor kan to andre beregningsmetoder også anvendes til opskaleringen.

**R**: Retentionen eller tilbageholdelse af fosfor i vandløbssystemerne er hidtil udelukkende blevet beregnet for søerne ved anvendelse af erfaringstal fra sø-overvågningen i NOVA. Der er således ikke taget hensyn til en temporær og eventuel permanent fosfortilbageholdelse i vandløb, vådområder og oversvømmede engarealer (jævnfør afsnit 3.5).

Udledningerne af total-fosfor fra punktkilder (**P**) til vandløb og søer i Danmark er reduceret fra ca. 2.600 tons fosfor i 1989 til ca. 677 tons fosfor i 2001. Reduktionen i fosforudledningen fra punkt-

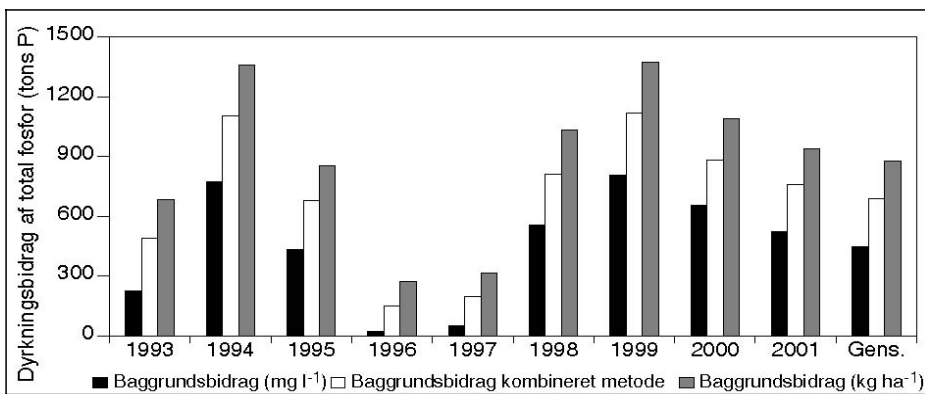


kilder er dermed på næsten 75%, og den skyldes hovedsageligt en bedre spildevandsrensning på rensesanlæg samt en reduktion i fosforudledningerne fra dambrug.

I takt med den reducerede fosforudledning fra punktkilder er fosforbidraget fra diffuse kilder (dyrkningsbidrag og baggrundsbidrag) til ferskvand steget i betydning fra at udgøre under 30% i 1980'erne til at udgøre over 70% i perioden 1999 - 2001. Med de i NOVA valgte måle- og beregningsmetoder efter korrektion for klima kan der ikke konstateres nogle ændringer i størrelsen af fosfortabene fra de diffuse kilder i perioden fra 1989 til 2001, da analyser af tidsserier af koncentrationen af total-fosfor i vandløb fra NOVA, der afvander fortrinsvis dyrkede typeoplande entydigt viser, at der generelt ikke er sket signifikante stigninger eller fald i fosfortabet fra diffuse kilder i perioden 1989 - 2001 (Bøgestrand, 2002). I delafsnit 3.6.2 findes en detaljeret redegørelse for den tidsmæssige trend i forskellige vandløb og for de tiltag i perioden, der forventes at have påvirket dyrkningsbidragets størrelse.

#### *Dyrkningsbidraget af fosfor beregnet ud fra havstationsnettet*

Dyrkningsbidraget af fosfor fra Danmark beregnet ved hjælp af havstationsnettet er vist i figur 3.20 for perioden 1993 - 2001. Dyrkningsbidraget er beregnet ved hjælp af kildeopsplitning og med anvendelse af 3 forskellige metodiske forudsætninger til kvantificering af baggrundsbidraget. Baggrundsbidraget af fosfor er nærmere beskrevet i afsnit 3.4.1. Uanset den anvendte metode til beregning af baggrundsbidraget ses der at være en meget stor år til år variation i fosfortabet fra dyrkede arealer (figur 3.20). Dyrkningsbidraget er størst i våde år som 1994, 1998 og 1999 og mindst i tørre år som 1996 og 1997 (figur 3.20).



**Figur 3.20** Beregnet tab af total-fosfor fra dyrkede arealer i Danmark til ferskvand (vandløb og søer) i perioden 1993-2001 ved hjælp af målestationerne i havstationsnettet. Ved beregningen er anvendt kildeopsplitning og 3 forskellige metoder til opskalering af baggrundsbidraget af total-fosfor (vandføringsvægtet koncentration for total-fosfor (mg/l), kombineret metode i form af vandføringsvægtet koncentration for opløst orthofosfat og arealkoefficient for partikelbundet fosfor samt arealkoefficient for total-fosfor (kg/ha)).

### *Dyrkningsbidraget af fosfor beregnet ud fra typeoplands-stationsnettet og stikprøvetagning*

Denne metode til beregning af dyrkningsbidraget af fosfor til vandløb og søer baseres på en opskalering af målinger fra 27 målestationer i vandløb, der fortrinsvis afvander mindre oplande. Det forholdsvist store antal målestationer er beliggende overalt i Danmark. De forventes derfor at være rimeligt repræsentative hvad angår naturgivne forhold som klima og jordbund samt landbrugsforhold. Ved anvendelse af typeoplände til opskalering er der både en række fordele og en række ulemper:

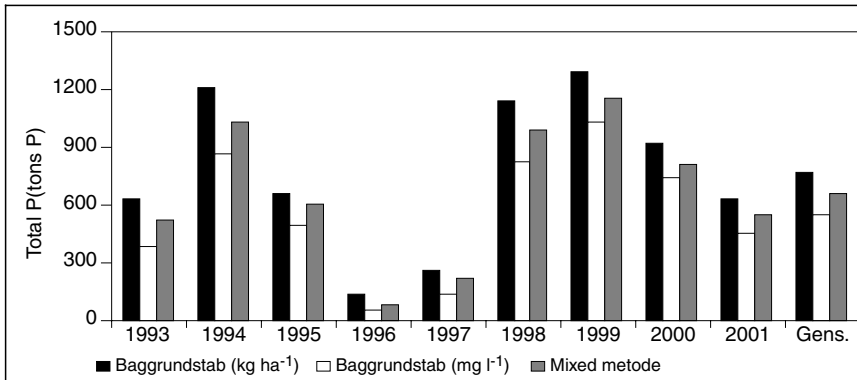
- Eventuel usikkerhed forbundet med ekstrapolation af data til umålte arealer som i havstationsnettet undgås ved denne metode. Derimod baseres opgørelsen på en meget mindre stikprøve af landets areal og med en overvægt af mindre oplande.
- De 27 typeoplände er fri for fosforudledninger fra større punktkilder, hvorved der kan ses bort fra eventuelle usikkerheder forbundet med deres opgørelse.
- Tilbageholdelse af fosfor i søer har kun mindre betydning i de 27 oplande, hvorfor der kan ses bort fra eventuelle usikkerheder i beregningen af fosfortilbageholdelse eller frigivelse i søer.

Tilbage som kilder til fosfor i de 27 typeoplände er baggrundstabet, spredt bebyggelse og landbrug. Ved at eliminere to af leddene i ligningen for kildeopsplitning vil beregningen af landbrugsbidraget som en residual alt andet lige blive mere sikker.

Efter beregning af dyrkningsbidraget på baggrund af typeopländene kan dyrkningsbidraget for hele landet beregnes ved en opskalering. Det sker ved at multiplicere det beregnede dyrkningsbidrag pr. hektar med det årligt opgjorte dyrkede areal i Danmark.

Usikkerheden ved denne opskalering er, at den udelukkende er baseret på målinger i mindre oplände. Det forudsættes derfor, at tabet af fosfor fra disse oplände er gældende også længere nedstrøms i vandsystemerne. Denne forudsætning er ikke nødvendigvis korrekt på grund af ændret hydrologi, transportveje og tilbageholdelsesmekanismer i større oplände.

Beregningen af dyrkningsbidraget af total-fosfor på baggrund af målinger i 27 typeoplände og med fastlæggelse af baggrundstabet ud fra 3 metoder er vist i figur 3.21. Som det var tilfældet ved kildeopsplitning af dyrkningsbidraget på baggrund af havstationsnettet er dyrkningsbidraget af fosfor størst ved anvendelse af arealkoefficient til fastlæggelse af baggrundsbidraget.

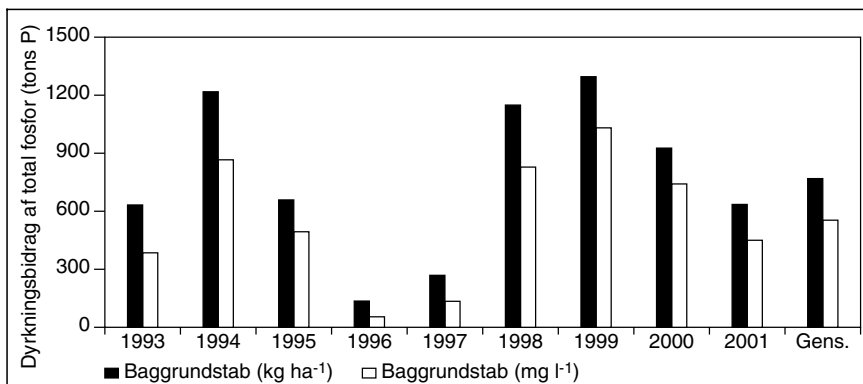


**Figur 3.21 Opskaleret dyrkningsbidrag af total-fosfor til ferskvand (vandløb og søer) i Danmark beregnet på baggrund af 27 typeoplunde og stikprøvetagning af fosforkoncentrationer (12-26 prøver pr. år). Ved beregningen er anvendt kildeopsplitning og 3 forskellige metoder til opskalering af baggrundstabet af total-fosfor (arealkoefficient for total-fosfor (kg/ha), vandføringsvægtet koncentration for total-fosfor (mg/l) samt kombineret metode i form af vandføringsvægtet koncentration for opløst orthofosfat og arealkoefficient for partikelbundet fosfor (mixed metode)).**

*Dyrkningsbidraget af fosfor beregnet ud fra typeoplunds-stationsnettet og intensiv prøvetagning*

I en delmængde af de 27 typeoplunde er fosforkoncentrationen i vandløb målt intensivt ved anvendelse af automatiske prøvetagere (tids- og/eller flowproportionalt) med analyse af en puljet vandprøve pr. uge. I perioden 1993 - 2001 har 7 vandløb været omfattet af det intensive prøvetagningsprogram. Da fosforkoncentrationen især i mindre vandløb bliver meget højere ved nedbør, og deraf følgende stigende vandafstrømning i vandløb, er automatisk prøvetagning nødvendig for at kunne beregne fosfortransporten.

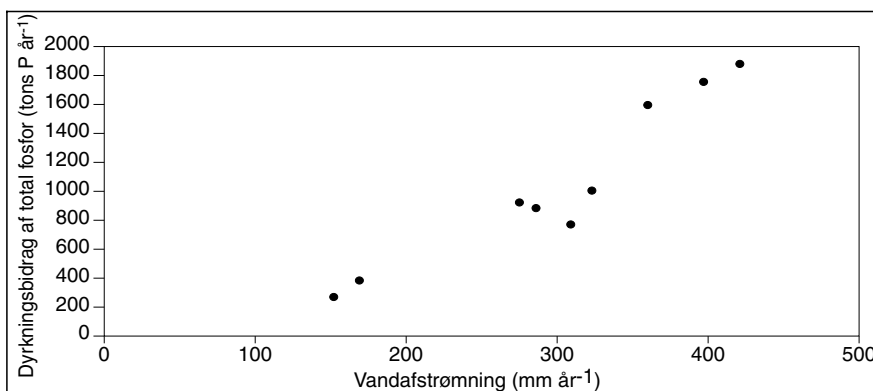
I figur 3.22 er vist det opskalerede dyrkningsbidrag af total-fosfor til vandløb og søer i Danmark, hvor opgørelsen baseres på en opskalering af resultaterne af den intensive prøvetagning og med korrektion for baggrundsbidraget ved anvendelse af to metoder. Som forventet er dyrkningsbidraget af total-fosfor større end ved anvendelse af resultaterne fra de 27 typeoplunde med stikprøvetagning. Anvendelse af intensiv prøvetagning ses især at have betydning for opgørelsen af dyrkningsbidraget i våde år som 1994 og 1998.



**Figur 3.22 Opskaleret dyrkningsbidrag af total-fosfor til ferskvand (vandløb og søer) i Danmark beregnet på baggrund af en korrektion af tabet fra de 27 typeoplunde med data fra 7 vandløb med intensiv prøvetagning af fosforkoncentrationer (ugentligt puljet). Ved beregningen er anvendt kildeopsplitning og 2 forskellige metoder til opskalering af baggrundstab af total-fosfor (vandføringsvægtet koncentration for total-fosfor (mg/l) og arealkoefficient for total-fosfor (kg/ha)).**

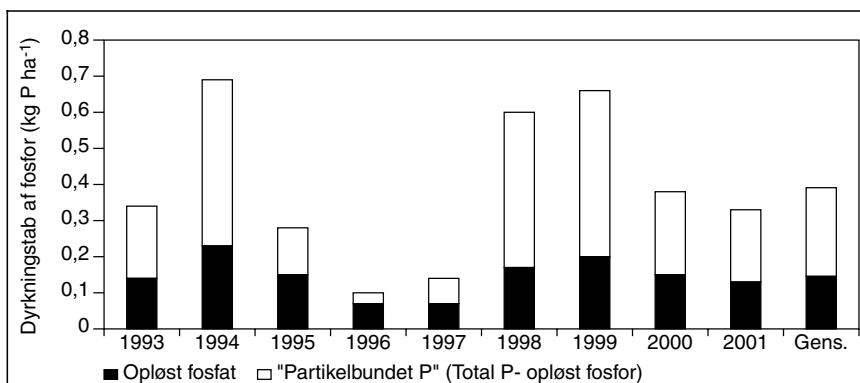
Af figur 3.23 ses det, at fosforbidraget fra dyrkede arealer stiger næsten lineært med vandafstrømningen i det enkelte år, når de intensive prøvetagninger anvendes. Ved en fordobling af vandafstrømningen fra 200 til 400 mm pr. år op mod firedobles dyrkningsbidraget. Dette forhold indikerer, at nye kildeområder og transportveje for fosfor bliver initieret i vandløbsoplunde, jo vådere året er.

Andre faktorer påvirker dog også det beregnede dyrkningsbidrag. I tørre år med lille vandafstrømning vil der være en stor midlertidig tilbageholdelse af fosfor i vandløb, som ikke er medregnet i kildeopsplitningen. Omvendt vil udledningen af fosfor fra spredt bebyggelse formentlig blive overvurderet i tørre år på grund af manglende afstrømning via drænen. Tilbageholdelse af fosfor på temporært oversvømmede engarealer vil være størst i våde år med stor afstrømning. I våde år vil det være med til at undervurdere dyrkningsbidraget af fosfor.



**Figur 3.23 Dyrkningsbidrag af total-fosfor beregnet ud fra vandløbsstationer med intensiv prøvetagning og baggrundsbidrag beregnet med arealkoefficient-metoden.**

I figur 3.24 er vist det beregnede dyrkningstab af opløst fosfat og 'partikelbundet' fosfor (beregnet som differencen total-fosfor minus opløst uorganisk fosfor) for hvert af årene i perioden 1993 til 2001. Tabet af partikelbundet fosfor udgør i gennemsnit ca. 60% af det totale fosfortab. Det er især i de våde år 1994, 1998 og 1999, at partikelbundet fosfor er den dominerende fosforfraktion.



**Figur 3.24 Dyrkningstab af opløst fosfat og 'partikelbundet' fosfor beregnet ud fra målestationer med intensiv prøvetagning og med baggrundsbidrag beregnet med arealkoefficient-metoden.**

#### *Sammenligning og diskussion af resultater fra de anvendte metoder*

Som forventet er dyrkningsbidraget af fosfor størst ved beregning ud fra en opskalering af intensive målinger i typeoplade og anvendelse af arealkoefficient-metoden til beregning af baggrundstabet af fosfor (tabel 3.18).

**Tabel 3.18 Sammenligning af det beregnede gennemsnitlige årlige dyrkningsbidrag af total-fosfor i perioden 1993-2001 ved anvendelse af tre mulige datasæt fra NOVA-programmet og med tre forskellige metoder til fastlæggelse af baggrundsbidraget**

	Dyrkningsbidrag beregnet ved anvendelse af arealkoefficient for baggrundstabet (kg P/ha)	Dyrkningsbidrag beregnet ved anvendelse af vandføringsvægtet koncentration for baggrundstabet (mg P/l)	Dyrkningsbidrag beregnet ved anvendelse af arealkoefficient (partikelbundet P) & vandføringsvægtet koncentration (opløst P)
1. Kildeopsplitning af havbelastning	880 tons P	450 tons P	690 tons P
2. Typeoplade (stikprøvetagning)	770 tons P	550 tons P	660 tons P
3. Typeoplade (intensiv prøvetagning)	1.050 tons P	840 tons P	950 tons P

- 1: Kildeopsplitning af havbelastning er baseret på målinger af fosfortransport i vandløb, der dækker ca. 50% af landets areal.
- 2: Typeoplade (stikprøvetagning) er baseret på målinger i 27 mindre, dyrkede oplade spredt over hele landet, hvor der ikke sker udledninger af fosfor fra større punktkilder (>30 PE). Tabet af fosfor pr. hektar landbrugsareal er opgjort som gennemsnit og herefter er der opskaleret til hele det dyrkede areal.
- 3: Typeoplade (intensiv prøvetagning) er baseret på (2), men med en korrektion for underestimering af fosfortransporten i vandløb ud fra 7 stationer med intensiv vandprøvetagning (tids- eller flow-proportionalt).

Det mindste dyrkningsbidrag af fosfor fås ved anvendelse af vandføringsvægtet koncentration ved beregning af baggrundstabet. Denne metode forventes dog at overvurdere baggrundstabet af fosfor og dermed undervurdere dyrkningsbidraget. Ved anvendelse af arealkoefficient til beregning af baggrundstabet af fosfor opnås den bedste overensstemmelse mellem de tre beregningsmetoder af dyrkningsbidraget af total-fosfor til ferskvand (tabel 3.18).

Med den nuværende viden er det ikke muligt entydigt at afgøre hvilken beregning, der giver den mest korrekte fastsættelse af dyrkningsbidrag af fosfor til vandløb og søer. Det bedste faglige skøn er, at dyrkningsbidraget af fosfor må antages at have været i størrelsesordenen 690 – 1.050 tons fosfor pr. år i perioden 1993 - 2001. I samme periode er der ikke konstateret signifikante stigninger eller fald i dyrkningsbidraget af fosfor ved analyse af de foreliggende tidsserier fra vandløb.

Det beregnede dyrkningsbidrag udgør i gennemsnit maksimalt 1.050 tons fosfor pr. år for perioden 1993 - 2001. Med samme beregningsmetode, hvad angår bestemmelsen af baggrundstabet af fosfor, blev dyrkningsbidraget for perioden 1989 - 1999 beregnet til i gennemsnit at være 1.300 tons fosfor pr. år. Forskellen skyldes formentlig alene forskelle i vandafstrømningen i de betragtede perioder.

Et vigtigt resultat af ovenstående analyser er konstateringen af den meget store år til år variation i dyrkningsbidraget af fosfor, specielt hvad angår partikelbundet fosfor. Den store variation indikerer, at nye kildeområder og transportveje bidrager med fosfor i våde år. Disse kilder og transportveje er formentlig i høj grad relateret til erosionsbidrag, overfladisk afstrømning og tab via drænen. Der kan iværksættes forskellige lokale foranstaltninger til reduktion af fosfortabet fra sådanne kildeområder og transportveje (nærmere herom i de efterfølgende afsnit).

### **3.6.2 Trends i det diffuse fosfortab fra 1989 til 2001**

Data fra det landsdækkende overvågningprogram (NOVA) testes hvert år for udvikling (trend) ved anvendelse af en sæsonbaseret Mann-Kendall metode, hvor der korrigeres for afstrømningens indflydelse på de målte fosforkoncentrationer (se f.eks. Bøgestrand, 2002). Den statistiske trendanalyse af fosforkoncentration gennemføres bl.a. på målinger fra 38 vandløb, som afvander mindre, dyrkede oplande uden fosforudledninger fra større punktkilder (> 30 PE). I perioden 1989-2001 er der generelt ikke konstateret nogen signifikant ændring i fosforkoncentrationen i vandløb, der afvander dyrkede oplande uden større punktkilder (tabel 3.19). Analyser af fosforkoncentrationen i 7 vandløb, som afvander udyrkede arealer, udviser heller ikke nogen signifikant stigning eller fald (tabel 3.19). Derimod er der konstateret et signifikant fald i fosforkoncentrationen i 55 ud af 76 vandløb, som afvander oplande med udledninger af spildevand (tabel 3.19).

I tre ud af de 38 vandløb, der afvander dyrkede oplande uden større punktkilder, er der dog konstateret en signifikant stigning i fosforkoncentrationen. Tilsvarende er der i tre vandløb konstateret et signifikant fald i fosforkoncentrationen. Der er således enkelte eksempler på oplande, hvor der er sket henholdsvis stigninger og fald i fosforkoncentrationen. En nærmere analyse af en række forhold i oplande, hvor der er sket stigninger/fald, er nødvendig for at kunne afklare årsagerne hertil.

**Tabel 3.19 Statistisk test for ændring i fosforkoncentrationen i forskellige typer af vandløb i perioden 1989-2001**

Oplandstype	Antal vandløb	Antal vandløb uden signifikant ændring	Antal vandløb med signifikant stigning	Antal vandløb med signifikant fald
Naturoplande	7	7	0	0
Dyrkede oplande uden større punktkilder	38	32	3	3
Dyrkede oplande med større punktkilder	76	21	0	55

I perioden, siden den første Vandmiljøplan blev vedtaget, er der sket en del reguleringer, som alle kan have haft indflydelse på fosforkoncentrationen i vandløb (tabel 3.20). Som det ses af tabellen, er der tale om mange enkeltstående ændringer, der alle kan have påvirket fosfortabet fra diffuse kilder til vandløb. Nogle af de gennemførte ændringer har givetvis haft en positiv effekt ved at begrænse fosfortabet til vandløb (f.eks. indførelse af fosfatfrie vaskemidler i husholdningerne). Derimod er der andre ændringer (f.eks. indførelse af vintergrønne marker med anvendelse af vinterkorn), som har haft en negativ virkning ved at øge jorderosionen og dermed tabet af fosfor til vandløb med overfladisk afstrømning. Med vandløbsmålinger kan man kun opgøre den samlede virkning af de mange virkemidler/ændringer på fosforkoncentrationen. Den samlede virkning er således generelt neutral, bedømt ud fra en analyse af vandløbsmålingerne i perioden 1989-2001.

Der er dog endnu et forbehold, som det er vigtigt at holde sig for øje, når der testes for en udvikling i fosforkoncentration i vandløb: Fosfor er i større udstrækning end kvælstof påvirket af det enkelte års klima i form af nedbør, frost og sne. Det skyldes, at erosionsprocesser (jorderosion og brinkerosion) er meget betydende tabsposter for partikelbundet fosfor, mens der for kvælstof i langt højere grad er tale om en udvaskning af opløste uorganiske kvælstoffraktioner fra jorden. Derfor skal der mange års målinger til for med sikkerhed at kunne påvise et fald i fosforkoncentrationen i vandløb, når det handler om fosfortab fra diffuse kilder. Perioden i 1990'erne var meget præget af store udsving i klimaet i form af ekstremt tørre år (1989 og 1996/1997) og ekstremt våde år (1993/1994 og 1998/1999). De store udsving i de klimatiske forhold igennem 1990'erne kan også være en del af forklaringen på, at der ikke konstateres en signifikant udvikling i fosforkoncentration i vandløb, der afvander dyrkede arealer, ud fra målinger i vandløb.

Ved at analysere for udvikling i fosfor på baggrund af målinger i vandløb fokuseres der på den samlede effekt af en sum af diffuse kilder (gårdbidrag, markbidrag, spredt bebyggelse, baggrundsbidrag). Ønsker man bedre informationer om dyrkningsbidragets størrelse og tidslige ændringer heri, må man fokusere på direkte målinger af fosfortabet fra de forskellige kildeområder og transportveje (jorderosion, dræntab, brinkerosion, spredt bebyggelse mv.).

**Tabel 3.20 Oversigt over tiltag eller generelle ændringer i vandløbsoplande, som kan have påvirket det diffuse fosfortab siden midten af 1980'erne**

<b>Ændringer</b>	<b>Formodet effekt</b>
Skift til anvendelse af fosfatfrie vaskemidler i husholdninger	Har med sikkerhed reduceret fosforudledningen fra spredt bebyggelse til vandløb
Indførelse af miljøvenlig vandløbsvedligeholdelse	Kan både have øget og reduceret den fosfortilledning til vandløb, der sker via brinkerosion og via tilbageholdelse af fosfor i vandløb
Indførelse af lovpligtige 2 m udyrkede bræmmer langs naturlige vandløb eller i regionplanen højt målsatte vandløb og søer	Har formentlig reduceret fosfortilførsel til vandløb fra overfladisk afstrømning og brinkerosion
Forbud mod udledninger fra gårde	Har formentlig reduceret fosforudledningen fra gårde (gårdbidraget) til vandløb
Krav om vintergrønne marker	Vintergrønne marker blev i stort omfang opfyldt ved at så vintersæd, som har vist sig at øge risikoen for jorderosion og dermed forøge fosfortabet til vandløb
Fosforoverskud i landbruget på mere end 200 kg/ha fosfor i monitoringsperioden	Fosforpuljen i landbrugsjorden er blevet større og fordelingen af overskuddet har været skæv, hvilket har øget fosfortabspotentialet fra landbrugsjorden
Ændret håndtering af husdyrgødning	Krav om hurtig indarbejdning i jorden af udbragt husdyrgødning og forbud mod at udbringe husdyrgødning i vinterperioden har givetvis mindsket risikoen for tab af fosfor. Reguleringer af husdyrgødnings-N har også medført en vis regulering af fosfor (lidt bedre fordeling)

### 3.6.3 Kvantificering af dyrkningsbidraget ud fra erfaringer og eksisterende målinger af fosfortab via kendte tabsprocesser

Som beskrevet i foregående afsnit er vores viden om de enkelte tabsposter, der tilsammen udgør dyrkningsbidraget, utilstrækkelig. I tabel 3.21 har vi på trods heraf opstillet et bedste bud på en opsplitning af dyrkningsbidraget på forskellige poster. Dette er gjort for at skabe et overblik over vores viden om tabsbidragenes størrelsesorden på nationalt plan. Opsplitning er baseret på et uhomogent datamateriale og mange skøn. Da vi ydermere ved, at de forskellige tabsposter har store variationer fra år til år og fra sted til sted, er det vigtigt at være opmærksom på usikkerhederne og på, at dette skøn bør justeres, efterhånden som vi opnår bedre datagrundlag både om tabsposternes størrelse og deres udbredelse. Det er også vigtigt at være opmærksom på, at tabsposter, der i det nationale regnskab er beskedne, kan have væsentlig betydning på det lokale eller regionale niveau. Derfor bør estimaterne også regionaliseres, så snart der er datamateriale hertil, ligesom de bør genovervejes for væsentlige forventede ændringer i klimaet.



Grundlaget for og kvaliteten af de tal, beregninger og skøn, der ligger til grund for hver enkelt tabspost i tabel 3.21, er uddybet i den efterfølgende tekst:

**Tabel 3.21 Kvantitative skøn over forskellige tabsposters betydning for dyrkningsbidraget på nationalt plan. Kvaliteten af det faglige grundlag for at give disse skøn er angivet med plusser efter hvert tal : (+++++) høj; (++++) god; (+++) middel; (++) dårlig; (+) dur ikke**

	Forudsætninger og skøn anvendt ved beregning	Tons fosfor pr år
Vanderosion, partikulært fosfor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Der mobiliseres jord svarende til 0,37 kg P/ha erosionstruet areal (afsnit 3.4.5)</li> <li>&lt;5% af det dyrkede areal (2.675.000 ha) er erosionstruet</li> <li>10-50% af det mobiliserede fosfor når frem til vandløb eller sø</li> <li>Der er set bort fra fladeerosion</li> </ul>	2-20 (++)
Overfladisk afstrømning, opløst fosfor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Koncentration af opløst fosfor i afstrømmende vand, 0,18 mg P/l (afsnit 3.5.2)</li> <li>10-30 mm af afstrømning løber af som overfladisk afstrømning på truet areal</li> <li>Truet areal sættes til at være dobbelt så stort som det erosionstruede areal (&lt;10% af det dyrkede areal)</li> </ul>	5-15 (+)
Vinderosion	<ul style="list-style-type: none"> <li>Typisk erosionshændelse sat til afslibning af 1-2 mm jord (afsnit 3.4.4)</li> <li>Jordens fosforindhold sættes til 566 mg P/kg jord. 1 mm jord svarer til 15 tons jord pr. ha</li> <li>5% af afslebet fosfor ender direkte i vandløb eller sø</li> <li>Klimatiske betingelser for vinderosion forekommer hvert 10. år</li> <li>Ca. 10% af det potentielt truede areal på 1-1,5 mill ha er aktuelt truet</li> <li>Bidrag via den atmosfæriske deposition er ikke indregnet</li> </ul>	5-15 (+)
Brinkerosion	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tabrate på 6,7-15,8 g fosfor pr. meter vandløb i dyrkede oplande</li> <li>65.700 km vandløb i DK. Heraf ca. 2,675/4,3 på dyrkede arealer</li> <li>Tabet er formentlig overvurderet (se tekst)</li> </ul>	275-645 (++)
Tab via kunstige dræn på minerogene risikojorde	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tabet af total-fosfor sættes til 100-500 g P/ha (afsnit 3.4.7)</li> <li>Arealet af drænede risikojorde sættes til 10 –15 procent af de drænede minerogene jorde (som udgør:) (0,49 x (2.675.000 –75.000) =1.274.000 ha)</li> </ul>	15-90 (+)
Tab via kunstige dræn på lavrisikojorde	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tabet af total-fosfor sættes til 20-80 g P/ha (afsnit 3.4.7.)</li> <li>Arealet af drænede lavrisikojorde sættes til 85-90% af de drænede minerogene jorde i Danmark (1.274.000 ha)</li> </ul>	20-90 (+++)
Tab via kunstig dræning på lavbunds-jorde	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tabet af total-fosfor sættes til 400-3.000 g P/ha (afsnit 3.4.7)</li> <li>Arealet af lavbunds-jorde (75.000 ha) der er drænet sættes til 100%</li> </ul>	30-225 (+)
Øvre grundvand, drænet dyrket areal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Der afstrømmer 90 mm med en koncentration på op til 0,017 mg P/l (tabel 3.15) via dræn fra det drænede areal (1.274.000 ha)</li> </ul>	<20 (++)
Øvre grundvand, ikke drænet dyrket areal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fra udrænede dyrkede arealer (51% af dyrket areal) afstrømmer 260 mm vand</li> <li>Fosforkoncentrationen sat til &lt; 0,017 mgP/l (afsnit 3.4)</li> <li>Risikoområder eksisterer formentlig, men kan ikke identificeres med nuværende viden</li> </ul>	<60 (++)
Dyrkningbidrag	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anslået ud fra ovenstående skøn</li> </ul>	440-1180 (+)

### *Vanderosion, partikulært fosfor*

Vidensgrundlaget er spinkelt. Det er vanskeligt at angive en gennemsnitlig tabsstørrelse for et tab, der forekommer så uregelmæssigt i tid og rum, og hvor størrelsen af den enkelte erosionshændelse varierer voldsomt. Ligeledes er de faktorer, der anvendes for hvor meget fosfor, der når frem til vandløbet, fastsat på et meget spinkelt grundlag grænsende til et rent skøn. Der er set bort fra flade-erosion.

### *Overfladisk afstrømning – opløst fosfor*

Vidensgrundlaget stammer fra målinger af overfladisk afstrømmende vand på 28 marker i foråret 1998. Datagrundlaget er derfor meget spinkelt og kan således ikke forventes at være repræsentativt for alle marker, hvad angår kombinationer af jordtyper, fosforstatus, afgrøder, mv. Ligeledes er arealet, hvorfra der kan forekomme overfladeafstrømning, skønnet.

### *Vinderosion*

Vidensgrundlaget er overordentligt spinkelt, mange af de anvendte tal til beregningen er rene skøn. Det er væsentligt at huske på, at denne tabspost ikke indbefatter den største del af det vinderoderede fosfor, som hvirvles højt op for senere deponering over store hav- og landarealer som atmosfærisk deposition. Tabsposten er nationalt set lille, men kan regionalt have større betydning. Vinderosion kan lokalt bidrage med 0,3 – 0,6 kg fosfor pr. ha pr. mm afslebet jord.

### *Brinkerosion*

Vidensgrundlaget omkring fosfortabsposten fra brinkerosion stammer fra målinger i 33 mindre danske vandløb i dyrkede områder igennem 2 år, som er opskaleret til alle Danmarks vandløb i landbrugsområder. To års målinger afspejler ikke alle klimatiske forhold, og heller ikke eventuelle yderligere effekter som følge af vandløbsvedligeholdelse mv. er dækket ind af undersøgelsen. Herudover mangler der viden om omfanget af brinkerosion og –tab i vandløb i skov- og naturområder. Bidraget overestimeres sandsynligvis, da vi ikke kan korrigere for ”baggrunds-brinkerosionen” og da der ses bort fra den del af det eroderede fosfor, der forbliver i vandløbet eller flyttes via bundtransport i vandløbet, hvilket ikke er indbefattet i den gængse fastsættelse af dyrkningsbidraget.

### *Kunstige dræn på lavrisikojorder*

Vidensgrundlaget er data fra det landsdækkende overvågningsprogram (NOVA) og data indsamlet i forskellige forskningsprojekter mv. Vidensgrundlaget er spinkelt og kan derfor ikke forventes at omfatte alle kombinationer af jordtyper, afgrøder, fosforstatus, underjordsforhold mv. Drænet areal er sat til 49% af det dyrkede areal (Aslyng, 1980).

### *Kunstige dræn på minerogene risikojorder*

Vidensgrundlaget er overordentligt spinkelt, da det kun omfatter målinger på enkelte dræn. Et større empirisk datamateriale er nødvendigt for at kunne opnå et bedre estimat og viden om tabsprocessen relateret til jordfysik og –kemi og til dyrkningsmæssige forhold. Den andel af det dyrkede areal, der anses som risikoområder, er skønnet og derfor behæftet med stor usikkerhed.

### Tab via kunstige dræn på lavbundsjord

Vidensgrundlaget er spinkelt og bygger på målinger af få dræn i begrænsede perioder. Areal af lavbundsjord er meget usikkert fastsat. Lavbundsjord dækker endvidere over vidt forskellige jordtyper, fra marsk, littorinaaflejring, højmoser og ånære arealer. Disse afviger sandsynligvis fra hinanden mht. fosforbinding og frigivelse, men vi har ikke data til at behandle jordtyperne særskilt.

### Øvre grundvandsbidrag i drænet og ikke drænet dyrket areal

Vidensgrundlaget er spinkelt, og der kan ikke differentieres mellem grundvand dannet i forskellige jordtyper/geologiske aflejringer. Formentlig varierer dette bidrag også ganske betydeligt rumligt, og der vil være områder, hvorfra tabet kan være særligt stort. Disse risikoområder kan dog ikke udpeges med vores nuværende viden. Ligeledes er der regnet med ensartet nettonedbør for hele landet på trods af, at nedbørmængden varierer i Danmark, og der er et betydeligt sammenfald mellem ikke dræned jorde og nedbørmængder over gennemsnittet i den vestlige del af landet og dræned jorde og nedbørmængder lavere end gennemsnittet i den østlige del.

Kvantificeringen i tabel 3.21 kan bedst sammenholdes med det tal for dyrkningsbidraget, der opnås ved beregninger ud fra intensive målinger på små oplande i NOVA. Dette dyrkningsbidrag er i afsnit 3.6.1 angivet til at have en størrelse på ca. 1.050 tons P, hvilket er i rimelig overensstemmelse med kvantificeringen ud fra de enkelte tabsposter i tabel 3.21. Da begge disse størrelser relaterer sig til målinger foretaget i små oplande, er de ikke behæftet med de usikkerheder, der støder til ved estimering længere nede i vandløbssystemet, såsom tilbageholdelse og større bidrag fra nedre grundvand.

### Grundvandsbidrag, nedre grundvand (tabel 3.22)

Dette bidrag er ikke et dyrkningsbidrag, men det kan i øjeblikket ikke isoleres ud fra overvågningsprogrammet.

**Tabel 3.22 Kvantitativt skøn over fosforbidraget via nedre grundvand og atmosfærisk bidrag. Kvaliteten af det faglige grundlag for at give disse skøn er angivet med plusser efter hvert tal : (+++++) høj; (++++) god; (++++) middel; (++) dårlig; (+) dur ikke**

	Forudsætninger og skøn anvendt ved beregning	Tons fosfor pr. år
Grundvandsbidrag, nedre grundvand	<ul style="list-style-type: none"><li>• Der afstrømmer 45 mm vand som nedre grundvand</li><li>• Der regnes med hele Danmarks areal</li><li>• 25 til 50% af arealet tillægges høj fosforkoncentration (0,1-0,2 mgP/l)</li><li>• 50-75% af arealet tillægges en lav fosforkoncentration (&lt;0,017 mg P/l)</li></ul>	45-130 (++)
Atmosfærisk bidrag	<ul style="list-style-type: none"><li>• Det atmosfæriske bidrag sættes til 0,08 kg p/ha</li><li>• Arealet af vandløb og søer sat til 65.000-79.000 ha</li><li>• Heraf findes ca 2,675/4,3 på dyrkede arealer</li></ul>	<5 (++++)

### Atmosfærisk bidrag (tabel 3.22)

Arealet af søer og vandløb er opnået ved at summere arealet af søer over 1.000 m<sup>2</sup> (550 km<sup>2</sup> ud fra oplysninger fra AIS), og arealet af vandløb beregnet ud fra vandløbslængder angivet i tabel 3.7. Dette giver et areal på i alt 643 - 790 km<sup>2</sup>.

Udvaskningen af fosfor fra rodzonen kan også estimeres, hvilket er gjort i tabel 3.23. Fosfor, der er udvasket fra rodzonen, kan betragtes som tabt fra landbrugsjorden til de dybere jordlag, men ikke tabt til vandmiljøet. Langt størstedelen tilbageholdes i underjorden.

**Tabel 3.23 Kvantitativt skøn over fosfor udvasket fra rodzonen i landbrugsjorden. Kvaliteten af det faglige grundlag for at give disse skøn er angivet med plusser efter hvert tal : (++++) høj; (++++) god; (+++) middel; (++) dårlig; (+) dur ikke**

	Forudsætninger og skøn anvendt ved beregning	Tons fosfor pr. år
Udvasket fra rodzonen, lavrisikoområder	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bidraget sættes til 0,03- 0,06 kg/ha for både sand og lerjorde (sandjorde ligger i den høje ende, lerjorde i den lave, tabel 3.13)</li> <li>• Lavrisikoområdet anses for at udgøre 85-90% af det dyrkede areal på 2,675 mill. ha</li> </ul>	70-145 (+++)
Udvasket fra rodzonen, risikoområder	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bidraget sættes til 0,2-0,8 kg P/ha</li> <li>• Risikoområdet anses for at udgøre 10-15% af det dyrkede areal</li> </ul>	55-320 (++)

### 3.7 Kortlægning af risikoområder for tab ved erosion

*Peder K. Bøcher, Preben Olsen, Brian Kronvang, Jørgen F. Hansen og Hans E. Andersen*

Potentielle risikoområder for fosfortab ved erosion og overfladeafstrømning er kortlagt af Kronvang et al. (2003). I undersøgelsen indgår vurderinger af, hvilken skala sådanne risikoområder kan udpeges på og sikkerheden i udpegningen.

En landsdækkende udpegning af potentielt eroderbare arealer nær vandløb og søer er foretaget ved brug af et Geografisk Informations System (GIS). I den efterfølgende validering af arealudpegningen er inddraget lokalt udførte målinger og observationer af erosionsforekomst (beskrevet i afsnit 3.4.5).

I projektet anvendtes en forenklet version af den i USA udviklede model RUSLE, *Revised Universal Soil Loss Equation*, (Renard et al., 1994). Denne model er designet til at beregne årlige gennemsnitlige erosionsrater (=jordtab) (Yoder et al., 1995). RUSLE er en teknisk videreudvikling af USLE (Wischmeier & Smith, 1978), og begge udtrykker det beregnede jordtab ved følgende generelle formel:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

hvor

**A** = Beregnet jordtab (tons ha<sup>-1</sup> år<sup>-1</sup>)

**R** = Klimatisk faktor (effekt af nedbør og afstrømning)

**K** = Jordbundens eroderbarhed (afhænger af jordtype)

**LS** = Effekt af hældning og hældningslængde

**C** = Effekt af drift (plantedække etc.)

**P** = Effekt af jordbevarende foranstaltninger (pløjeretning, terrasser etc.)

I det konkrete projekt er modellen reduceret til kun at omfatte de faktorer, der er tidsmæssigt bestandige, hvorfor der kun indgår jordens eroderbarhed (K), samt hældning (S) og hældningslængde (L):

$$A_{\text{pot}} = K \times L \times S$$

KLS –faktorerne antages ikke at variere med tid.  $A_{\text{pot}}$  skal dermed opfattes som et udtryk for den potentielle erosionsrisiko på en given lokalitet, idet der ikke tages hensyn til de faktorer (R, C og P), der varierer i løbet af et år, og som vil være udslagsgivende for, om en konkret erosionshændelse indtræffer på et givet sted.

Selve kortlægningen af potentiel erosionsrisiko i Danmark er baseret på DJF's jordbundsdata-baser ([www.djf-geodata.dk](http://www.djf-geodata.dk)), geomorfologisk kortlægning, landsdækkende informationer om vandløb og søer fra DMU's Arealinformationssystem (AIS) ([www.dmu.dk](http://www.dmu.dk)) og endelig på en digital højdemodel fra Kort og Matrikelstyrelsen ([www.kms.dk](http://www.kms.dk)).

Beregning af LS-faktoren baserer sig alene på den digitale højdemodel fra KMS. Denne består af et gitter af celler (grid-celler), som hver for sig repræsenterer et geografisk område på 25x25 meter og indeholder et mål for den gennemsnitlige højde for dette geografiske område. Højdemodellen er landsdækkende for Danmark og håndteres i et GIS. Det er på den baggrund muligt at benytte LS-formlen fra RUSLE til at beregne den akkumulerende afstrømningseffekt og dennes afledte erosionspotentiale skabt af landskabets topografi. Dette gøres for hver grid-celle, og resultatet er et kort bestående af grid-celler med værdier, som angiver et dimensionsløst mål for potentiel erosionsrisiko alene afhængig af topografi. Modelleringen er udført i ArcInfo ved brug af et AML-script udviklet af Hickey et al. (1994).

Usikkerheden for beregning af LS-faktoren er ikke kendt. Hvis man antager, at RUSLE-modellen er en præcis model til beregning af LS-faktoren, vil usikkerheder alene relatere sig til den anvendte digitale højdemodel. Ved den landsdækkende modellering af LS-faktoren viste det sig, at den digitale højdemodel for Fyn var meget fejlbehæftet, hvorfor Fyn blev udeladt af beregningerne. Selve datagrundlaget for den digitale højdemodel fra KMS er højdekurverne fra 4-cm kortet, og højdemodellen er således ikke baseret på digitalt produceret materiale. Det kan derfor ikke udelukkes, at der findes fejl i den anvendte højdemodel for andre områder end Fyn, og at det derfor vil påvirke de aktuelle beregninger af LS.

Kortlægning af K-faktoren baserer sig hovedsageligt på Den Landsomfattende Jordklassificering (Larsen & Sørensen, 1996), der er en kortlægning af jordtyper i 1:50.000, samt DJF's teksturdata-base, der håndterer oplysninger om teksturen i ca. 45.000 punkter fordelt over hele Danmark. For hvert af disse punkter beregnes en K-faktor værdi. Hver jordtypepolygon fra Jordklassificeringen er derefter tildelt en K-værdi baseret på en regionalisering af K-værdierne for teksturpunkterne. Denne regionalisering er foretaget på baggrund af geomorfologiske informationer, og tildelingen af K-værdier til jordtypepolygonerne er foretaget ved at beregne gennemsnittet af K-værdier for hver jordtype inden for hver georegion. Resultatet af denne fortolkning er tilrettet et gitter af 25x25 me-

ter celler, som muliggør en direkte sammenstilling af K-faktoren med den forømtalte kortlægning af LS-faktoren. Den rumlige opløsning af jordbundsinformationerne har egentlig en rumlig opløsning, der er grovere end 25x25 meters celler, og den rumlige tilretning sker således alene for at kunne sammenstille K- og LS-faktoren celle for celle.

I modelleringen multipliceres LS- og K-faktorerne, så en samlet KLS-værdi kan aflæses i hver celle (25x25 m) i et landsdækkende kort. Denne KLS-værdi er dimensionsløs, og tallet angiver derfor en relativ erosionsrisiko. Kortet viser således hver enkelt grid-celles potentielle erosionsrisiko.

Modelleringen af potentiel erosionsrisiko er udført for hele landet med undtagelse af Bornholm og Fyn. Højdemodellen er som nævnt fejlbehæftet for Fyn, og datagrundlaget for Bornholm kræver yderligere udvikling, inden kortlægning kan foretages. Den endelige udpegning af ferskvandsnære, potentielle erosionsområder er udført ved at lægge KLS-faktorkortet oven på et kort med sø- og vandløb.

En egentlig statistisk validering af de modellerede KLS-værdier i forhold til faktisk forekomst af erosion er ikke praktisk mulig. Dels fordi faktisk erosion afhænger af en række parametre, der netop ikke er taget højde for i KLS-faktoren ("land cover", "land management", nedbørsprofil etc.), og dels fordi man i så fald skulle udtage en meget stor stikprøve af slope units indenfor de forskellige KLS-værdier for at kunne dække alle kombinationer af arealanvendelse, afgrøder og landbrugspraksis i flere klimasituationer.

I stedet for er de modellerede KLS-værdier sammenholdt med observationer for forekomst af erosion på 189 marker fordelt på 20 lokaliteter spredt ud over landet (figur 3.25). Observationerne er foretaget i årene 1994-1999.

Udvælgelsen af disse lokaliteter er foregået med en forventning om relativ stor risiko for erosion. Der er foretaget 1.041 enkeltobservationer med varierende grad af erosion registreret i form af rillevolumen på den enkelte mark. Det skal bemærkes, at fladeerosion ikke blev kortlagt i ovenstående undersøgelse, hvorfor der kan have forekommet jorderosion og fosfortab med overfladisk afstrømning til vandløb og søer uden synlig rilledannelse, som dermed ikke er registreret.

Graden af målt erosion viste sig i stor udstrækning at være i overensstemmelse med de sammenhørende KLS-værdier. En sammenligning mellem det observerede rillevolumen for hvert observationspunkt og den maksimale KLS-værdi inden for en 300-m bufferzone omkring observationspunktet viser endvidere, at observationer af store rillevolumener ( $>10 \text{ m}^3$  pr. ha) kun forekommer ved relativt høje KLS-værdier ( $\text{KLS}>85$ ). På denne baggrund er erosionsobservationerne anvendt til at estimere en KLS-grænseværdi for høj erosionsrisiko, og KLS-værdien på 85 er benyttet som grænseværdi for angivelse af høj potentiel erosionsrisiko.



**Figur 3.25 Geografisk placering af observationspunkter.**

Som før omtalt tager KLS-modellen kun højde for tre stationære fysiske parametre og kortlægger dermed alene *potentiel* risiko for erosion. Det betyder, at selv om modellen udpeger et område til at have stor risiko for erosion, vil man ikke nødvendigvis observere forekomst af erosion i samme område. På den anden side bør man principielt ikke observere store erosionsværdier i områder, som ikke er udpeget af modellen, men der er dog ingen garanti for, at det ikke vil ske, idet jorderosion i form af rilledannelse og især fladeerosion med overfladisk afstrømning og tab af både partikelbundne og opløste fosforfraktioner også vil kunne forekomme ved lavere KLS-værdier. Dertil kommer, at observationerne er foretaget på et meget lille udvalg af det samlede areal, samt over forholdsvis kort tid. Som følge heraf kan de modellerede værdier ikke sammenlignes direkte med målt rillevolumen, der kan kun foretages en relativ sammenligning.

Figur 3.26 viser et kort over modelleret potentiel erosionsrisiko i Danmark. Den røde farve angiver høj risiko og dækker alle de arealer, som har en modelleret KLS-værdi over 85. Med gul farve er vist de arealer, der har værdier lige under dem, der i dette udredningsarbejde har høj risiko for erosion. De gule områder har et relativt lille arealdække i både det modellerede datasæt og i det indsamlede datasæt. De med grønt angivne områder dækker et stort areal i begge datasæt. Den mørkeblå farve angiver områder med en relativ lille udbredelse i det modellerede datasæt, men som har en relativ stor forekomst i det samlede datasæt. Intervallet med en lys blå farve udtrykker de mindste KLS-værdier. Disse har stor arealmæssig udbredelse i det modellerede landsdækkende datasæt, men er stærkt underrepræsenterede i det indsamlede datasæt. Det har, på det foreliggende grundlag, ikke

været muligt at kvantificere risikoen i andre klasser, end den med rødt anførte, som omfatter KLS-værdier større end 85.



**Figur 3.26** Kortlægning af erosionsrisikoklasser i Danmark. Kortlægning er ikke foretaget for Fyn på grund af fejl i højdemodellen for dette område. Endvidere er Bornholm udeladt, idet datagrundlaget her krævede videreudvikling, inden kortlægning kunne foretages (Kronvang et al., 2003).



I tabel 3.24 er givet en oversigt over arealet af potentielle højrisikoområder inden for de modellerede amter.

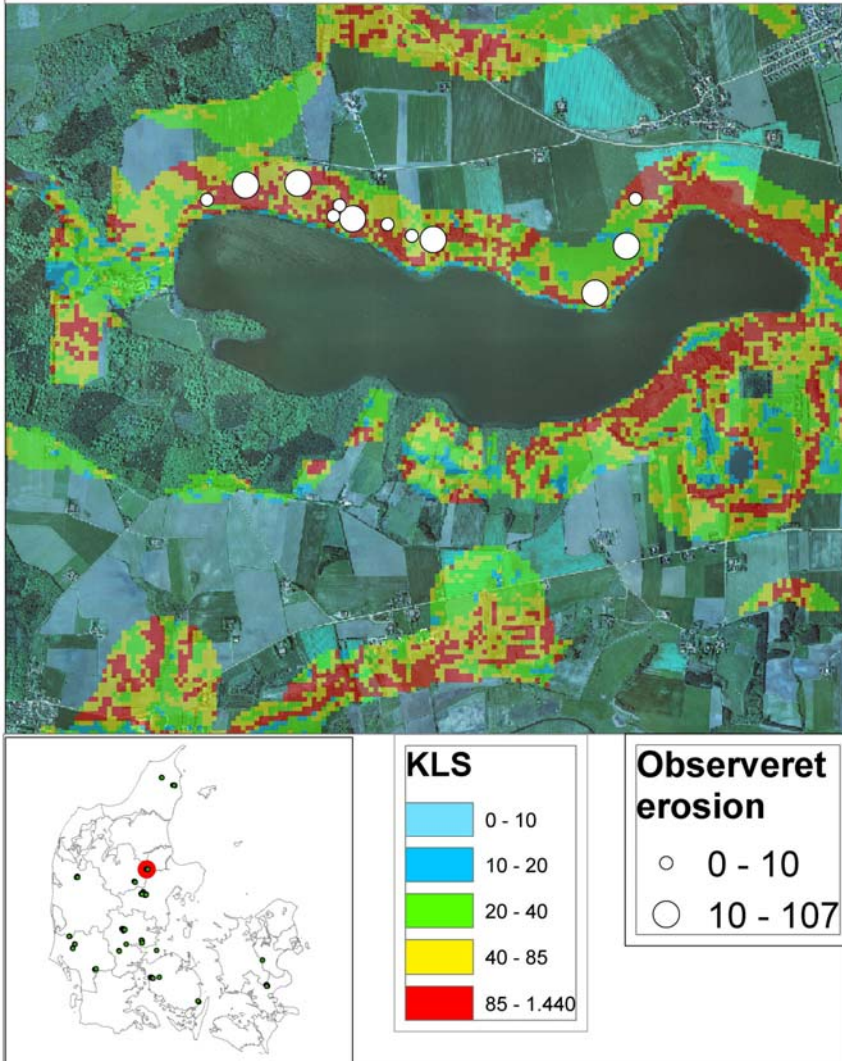
**Tabel 3.24 Summering af de potentielle højrisikoarealer inden for de modellerede amter (Kronvang et al., 2003)**

<b>Amt</b>	<b>Opgjort areal km<sup>2</sup></b>	<b>Potentielle højrisikoarealer (KLS &gt; 85) km<sup>2</sup></b>	<b>Andel af kortlagt areal (%)</b>
København	91	2,9	3,1
Frederiksborg	586	16,6	2,8
Roskilde	416	11,6	2,8
Vestsjælland	1372	41,2	3,0
Storstrøm	1933	18,1	0,9
Sønderjylland	2248	36,7	1,6
Ribe	1636	1,3	0,1
Ringkøbing	2511	14,5	0,6
Viborg	1779	63,8	3,6
Århus	1824	94,6	5,2
Vejle	1445	81,4	5,6
Nordjylland	3148	143,6	4,6
<b>I alt</b>	<b>18.989</b>	<b>526,3</b>	<b>2,8</b>

Det faktiske erosionstab vil som sagt afhænge af andre faktorer foruden de her kortlagte, nemlig den konkrete klimasituation og arealanvendelse. Hertil kommer, at eroderet materiale kan afsættes (deposition), inden det når frem til en recipient. Kortlægningens formål var en afgrænsning af områder – med potentiel erosionsrisiko – beliggende i ferskvandsnære områder og en opdeling af disse områder i risikoklasser og dermed en udpegning af områder af særlig interesse i erosionssammenhæng. Kortlægningen kan derimod ikke anvendes til en konkret udpegning af steder, hvor der skal foretages en erosionsbekæmpende indsats. Dertil kræves yderligere og mere detaljerede undersøgelser.

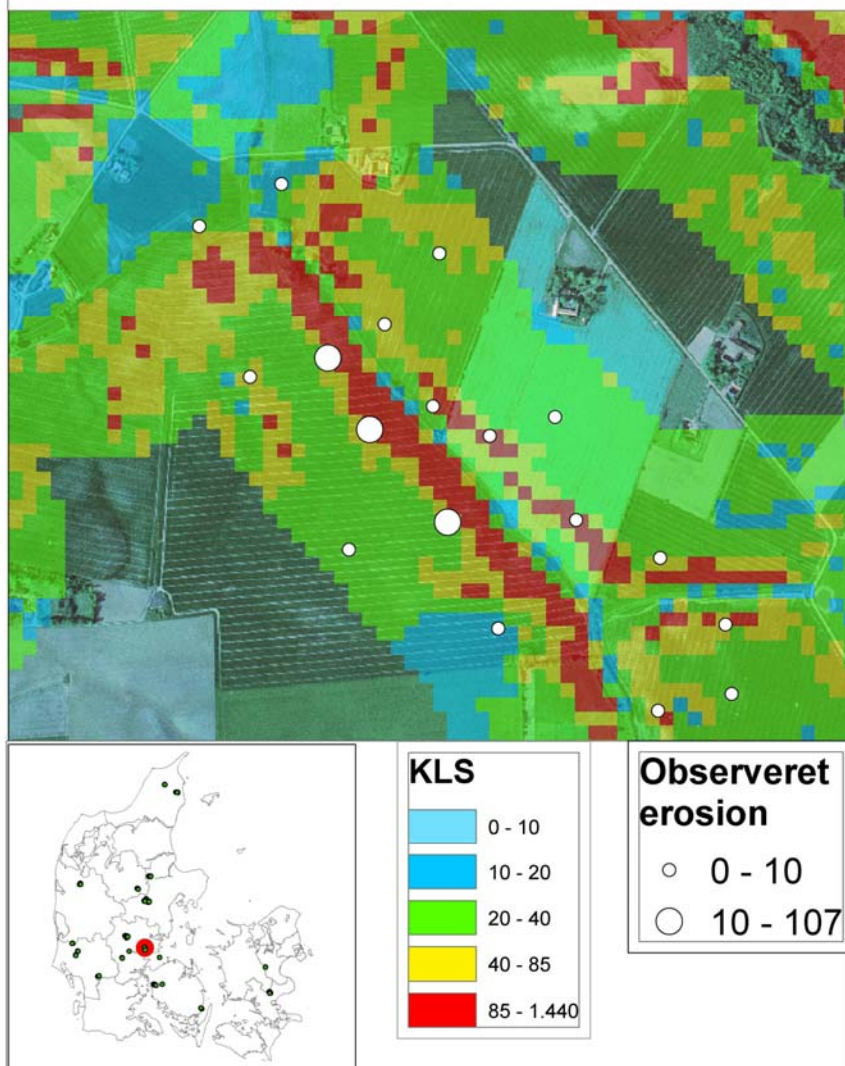
Figur 3.27 og 3.28 viser to eksempler på de testområder, der er inddraget i valideringen af de modellerede KLS-værdier.

## Sammenligning mellem observeret erosion og KLS værdi



Figur 3.27 Oversigt over testområdet ved Fusing Sø. Baggrundsbilledet er orthofoto fra 1999. Herover er vist erosionsrisikoarealer med en farveskala som angivet i signaturforklaringen. De observerede forekomster af erosion er inddelt i to klasser hhv. over eller under  $10 \text{ m}^3$  i alt inden for observationspunkterne (Kronvang et al., 2003).

## Sammenligning mellem observeret erosion og KLS værdi



**Figur 3.28** Oversigt over testområdet i Vejle Amt. Baggrundsbilledet er orthofoto fra 1999. Herover er vist erosionsrisikoarealer med en farveskala, som angivet i signaturforklaringen. De observerede forekomster af erosion er inddelt i to klasser hhv. over eller under  $10 \text{ m}^3$  i alt inden for observationspunkterne (Kronvang et al., 2003).

De modellerede KLS-værdier er desuden sammenholdt med observationer i NOVA-oplande. I 24 landbrugsdominerede NOVA-oplande varierende fra 3,7 km<sup>2</sup> til 41,9 km<sup>2</sup> er der foretaget observation af rilleerosion på marker langs vandløb efter vinteren 2000/2001. Der differentieres mellem 'små riller' og 'store riller', hvor store riller har et maksimalt tværsnitsareal på mindst knytnevæ-størrelse. Sammenhængen mellem observation af store riller vægtet i forhold til oplandsareal og maksimal KLS-værdi på marker er vist i tabel 3.25. Det ses, at der i modsætning til sammenligningen mellem erosion og KLS-værdi udført på 189 marker i 1994 – 1999 er observeret erosion af en vis betydning også på marker med maksimal KLS-værdi under 85. Dette skyldes, at KLS ikke giver en fuldstændig beskrivelse af de faktorer, der kan bevirke erosion. F.eks. ses der ofte erosionsriller i kørespor, idet disse akkumulerer og koncentrerer overfladisk afstrømmende vand. Ligeledes kan vand akkumuleres på befæstede arealer, f.eks. en vej, og herfra strømme koncentreret ud over en mark og give anledning til erosion. Der er ikke taget hensyn til betydningen af fysiske barrierer i landskabet som hegn, diger, grøfter mv. ved beregningen af KLS-værdierne. Brugeren skal derfor tage hensyn til disse elementer, når KLS-værdierne anvendes i konkrete områder. Endelig er den anvendte højdemodel (25x25 m) stadigvæk grov i forhold til fastlæggelse af en præcis LS-faktor på marker. Med den eksisterende højdemodel vil således beregnes mindre, maksimale KLS-værdier end de faktisk forekommende.

**Tabel 3.25 Sammenhæng mellem observeret rilleerosion i NOVA-oplande og KLS-værdi (Kronvang et al., 2003)**

KLS	0-10	10-20	20-40	40 - 85	>= 85
Antal erosionsobservationer	5	2	2	7	11

For hvert af de 24 NOVA-oplande er der beregnet et erosionsrisiko-index i form af en opgørelse af arealet med KLS-værdier større end hhv. 40 og 85. Opgørelsen er foretaget for den del af oplandsarealet, der befinder sig i en 100 m bufferzone omkring vandløb og søer. Opgørelsen er desuden begrænset til kun at omfatte dyrkede markblokke, således at permanent vegetationsdækkede arealer omkring vandløb og søer er ekskluderet. Arealet med KLS-værdier større end hhv. 40 og 85 er sluttelig vægtet i forhold til det totale oplandsareal. Størrelsen af risikoarealerne er pr. opland sammenholdt med antallet af marker med observationer af store riller, vægtet i forhold til oplandsarealet, gennem en Pearson korrelationsanalyse (tabel 3.26). Som det fremgår af tabellen, er der en positiv og stærkt signifikant korrelation mellem erosionsrisiko-index og observeret erosion.

**Tabel 3.26 Pearsson-korrelation (R) mellem observation af erosion og erosionsrisiko-index beregnet på oplandsskala (Kronvang et al., 2003)**

	KLS > 40	KLS > 85
Alle riller	0.47	0.51
	p<0.0001	p<0.0001
Store riller	0.51	0.63
	p<0.0001	p<0.0001

### 3.8 Perspektiver for udpegning af risikoområder for fosfortab via alle tabsprocesser

*Goswin Heckrath, Gitte Holton Rubæk og Brian Kronvang*

Som beskrevet er fosfortab en kompleks funktion af klima, topografi, hydrologi, jordbundsforhold, dyrkning og gødsning. Skal fosfortabet fra landbrugsjord reduceres, består opgaven i at håndtere tabsmængder, der størrelsesmæssigt kun udgør en brøkdel af fosforreserven i landbrugsjordene. Dette stiller store krav til de redskaber, der bliver nødvendige for at kunne udpege områder med særlig høj risiko for fosfortab og foreslå de bedst egnede tabsbegrænsende foranstaltninger.

Risikoen for fosfortab varierer tidsligt og rumligt både på regional-, opland- og markniveau. Det betyder samtidig, at der eksisterer begrænsede områder, der bidrager betydelig mere end andre til fosfortabet inden for et opland. Risikoområder, der benævnes *kritiske kildeområder* i den internationale litteratur, er områder, hvor en effektiv transportvej (f.eks. erosion, dræning) forbinder fosforkilder i landskabet (høj fosforstatus i jorden, gødningsfordeling på marker) med et vandløb eller en sø. Risikoområder findes således typisk på markniveau, og det er på dette niveau, der bør fortages tabsbegrænsende foranstaltninger.

En reduktion af fosfortabet fra landbrugsjord forudsætter en forståelse af samspillet mellem mange faktorer, således at tab kan beskrives tilstrækkeligt præcist. En identifikation af højrisikoområder i landskabet er derfor afgørende. Herved kan særlige tabsbegrænsende foranstaltninger iværksættes på relevante og mindre arealer, hvorved indsatsen bliver mere omkostningseffektiv, både mht. miljøet og landbruget.

Principielt forlanger kompleksiteten af tabsprocessen på landskabsplan en prædiktions af fosfortabet ved hjælp af modellering. I praksis har forsøg på en *deterministisk og mekanistisk* beskrivelse af fosfortabet i en rumlig sammenhæng indtil videre vist sig som utilstrækkelige. Det skyldes dels omfanget af inputdata og interkorrelationer mellem faktorer og dels en ustabil opførsel af systemet, hvor små diskrete og svært forudselige ændringer af enkelte tabsrelevante faktorer har en stor og afgørende betydning for fosfortabet. Resultatet kan meget vel blive, at adskillige kombinationer af parametre kan give det samme modeloutput. Derfor kan det være mere oplagt at bruge en stokastisk fremgangsmåde, hvor sandsynligheden for, at et bestemt parametersæt kan beskrive de observerede data acceptabelt, vurderes. Sådanne modeller leverer ikke en kvantitativ tabsvurdering på et bestemt tidspunkt. I stedet for vælges/fås et prædiktionsinterval svarende til mange forskellige acceptable parameterkombinationer (f.eks. Beven & Freer, 2001). Sådanne modeller er dog først nu under udvikling og mest i sammenhæng med afstrømningsprocesser alene.

På trods af den store internationale opmærksomhed, fosforproblematikken har haft de seneste 10 år, findes der kun få modeller, der forsøger at beskrive fosfortabet på en relevant skala for konkret risikovurdering. Således beskriver de fysisk-baserede modeller typisk kun en isoleret tabsproces, dvs. enten i form af overfladeafstrømning/erosion eller nedsivning og overfladenær afstrømning (Char-don & Schoumans, 2002). En del af modellerne er ydermere behæftede med de ovennævnte kritikpunkter. Holland er måske det eneste land i Europa, hvor modellering af fosfortab ved overfladenær

afstrømning og nedvaskning til grundvandet bruges direkte i evalueringen af regulering af gødsningspraksis og i sammenhæng med udarbejdelsen af miljølovgivning (Groenendijk, 2002). Ned-sivning til det øvre grundvand på sandede jorde er det største problem med hensyn til fosfortab i Holland. Selv om transportmodellen i dette hollandske modelsystem er udviklet til en skala svarende til en jordprofil, opskaleres der til landskabsniveau ved at definere homogene underregioner mht. jordtype, hydrologi og dyrkningssystem.

Kun det såkaldte fosforindeks anvendes officielt til praktisk rådgivning og planlægning i USA. Det robuste og enkle fosforindeks, som er baseret på konceptet om risikoområder, inddeler tabsrelevante faktorer i forskellige klasser, og deres vægte ganges sammen til et indeks for fosfortabsrisikoen på markniveau (Gburek et al., 2000). En af ulemperne ved det aktuelle fosforindeks er, at det er udviklet til forholdsvis høje tabsniveauer, og er utilstrækkeligt evalueret på oplandsniveau. Et lignede redskab med indeksskarakter og modular opbygning er det nyudviklede 'Phosphorus Indicator Tool - PIT' fra Storbritannien, der estimerer diffus fosfortab fra landbrugsjord til vandmiljøet på oplandsniveau (Heathwaite et al., 2003). Den rumlige opløselighed af 1 km<sup>2</sup> svarer til den højeste opløselighed nogle inputdata foreligger på. Modeludviklerne påstår, at PIT kan bruges specielt til vurdering af usikkerheder i vores forståelse af fosfortabet og til scenarieanalyse af tabsbegrænsende foranstaltninger på oplandsniveau. På grund af den forholdsvis grove skala er PIT imidlertid uegnet til risikovurdering og udpegning af konkrete tiltag på markniveau i praksis hos arealforvalterne.

### **3.8.1 Fremtidig model tilpasset danske forhold?**

Umiddelbart findes der intet redskab til udpegning af risikoområder under danske forhold, der opererer på mark- eller landskabselementniveau. Med henblik på anvendelighed ville en tilpasset indeksmodel være mest lovende til brug for miljøforvaltere. Anvendelsen af udenlandske fosforindeksmodeller vil dog kræve en tilpasning til danske forhold og grundig evaluering. Bl.a. bør erosions- og dræningsundermodeller specielt udviklet til danske forhold indgå i et dansk fosforindeks, og der bør foretages en vurdering af lavbundsjordenes rolle som kilde eller filter for fosfor, ligesom det bør undersøges, om brinkerosion med fordel kan inddrages i indekskonceptet.

Der mangler i mange tilfælde også data på den relevante skala for at kunne indekse mange af de tabsrelevante faktorer, såsom jordens fosforstatus, dræning og en højdemodel med tilstrækkelig opløselighed. Derfor må risikovurderinger p.t. foretages som en kortlægning af delfaktorer, f.eks. erosionsrisiko eller belastning med husdyrgødningsfosfor. Sådanne kortlægninger kan endnu kun foretages på en skala, der er grovere end hvad, der er ønskeligt for et operativt værktøj til udpegning af risikoarealer og tabsprocesser.

Formålet med en identifikation af højrisikoområder er, at foranstaltninger mod fosfortab vil kunne foretages målrettet og ikke hen over unødvendigt store arealer. Dette kræver principielt, at en høj differentiering af landskabet i tabsrelevante landskabselementer implementeres i modellen med høje omkostninger til fremskaffelse af inputdata til følge. En vigtig opgave i udvikling af et modelværktøj for fosfortab er en vurdering af hvilken skala, der i praksis vil være den optimale for risikovurdering. En sådan model skal kalibreres og evalueres på den samme skala, som den anvendes på, også med hensyn til fosfortransporten i vandløbene. Der findes på nuværende tidspunkt gode datasæt af

fosfortransporten i vandløb fra mange større og enkelte mindre oplande, dog mangler der næsten fuldstændigt data med en opløselighed, der kan adskille tabsbidraget fra enkelte landskabselementer via de forskellige transportveje til vandmiljøet.

### **3.9 Effekter af driftsmetoder og dyrkningssystemer**

*Gitte Holton Rubæk, Tommy Dalgaard og Jørgen F. Hansen*

Det, at et område dyrkes frem for at ligge hen som et naturareal, påvirker transportvejene for fosfor grundlæggende. Afstrømningsforhold ændres som følge af afvanding via dræn og grøfter, jordbearbejdning og den ændrede bevoksning. Også mængden af afstrømmende vand ændres, idet fordampningen fra afgrøder typisk vil være mindre end fordampningen i en naturlig permanent bevoksning (Kronvang et al., 2001). Jordens egenskaber med hensyn til fosforbinding og transport ændres også markant, når sædskifte og tilbagevendende jordbehandling er introduceret. Ligeledes har høst af og gødsning med fosfor direkte indflydelse på størrelsen af fosforpuljen i jorden. Det er da også et faktum, at et fosfortab til vandmiljøet i et dyrket opland er større end tabet af fosfor i et tilsvarende naturopland. Det er til gengæld uvist, hvor stor en del af tabet, der kan tilskrives opdyrkningen i sig selv og heraf følgende ændringer i afstrømningsforhold og bindingsforhold i jorden, og hvor stor en del, der kan henføres til det gødningsfosfor, der er akkumuleret i landbrugsjordene. Det, at man ikke kan redegøre for, hvad henholdsvis de ændrede bindings- og afstrømningsforhold betyder for tabets størrelse, og hvad der kan henføres til den akkumulering af fosfor, der er i landbrugsjord, begrænser os væsentligt, når vi skal skønne, hvor stor en reduktion i fosfortabet til vandmiljøet, der kan forventes ved f.eks. at mindske fosforpuljen i jorden med en given procent.

#### **3.9.1 Jordbearbejdning**

Jordbearbejdningserosion kan flytte store mængder jord omkring på marker. Processen kan forårsage flytning af fosforrig overjord til lavninger, hen langs skel og tæt ned til vandløb. Generelt vil jordbearbejdningserosionen stige med stigende hældning, hvorimod jordtypen kun har mindre betydning. Karakteren af jordbearbejdningen har derimod stor betydning, specielt kørselsretning, kørselshastighed og bearbejdningstype er væsentlige faktorer, der påvirker omfanget af jordbearbejdningserosionen. Jordbearbejdning vil kun i mindre grad sortere jorden i fraktioner. Den vil hovedsagelig medføre, at fosforrig overjord bevæger sig ned ad bakke og tættere på vandløb og søer. Samtidig vil underjord blive indarbejdet i pløjelaget på bakketoppene (Jacobsen et al., 2000; Heckrath et al., 2002a). I opgørelser over fosfortab fra landbrugsjord vil denne proces ikke indgå med et selvstændigt bidrag. Processen vil have betydning for omfanget af de andre tabsprocesser og vil have betydning for flere virkemidler til begrænsning af fosfortab.

Ved normal jordbearbejdning løsnes og blandes det øverste 20 - 30 cm jordlag gennem pløjning, hvorefter der sker en såbedstilberedning. Ved reduceret jordbearbejdning løsnes jorden til mindre dybde, og der foretages mindre opblanding af jorden. Herved vil tilført gødningsfosfor i højere grad koncentreres i det allerøverste jordlag, hvilket måske kan øge fosfortabet, ifald der sker erosion, overfladeafstrømning eller nedvaskning via makroporer til dræn. Ved normal jordbearbejdning kan der ske dannelse af pløjesål. I undersøgelser af reduceret jordbearbejdning er det fundet, at pløjefri dyrkning har en positiv langtidsvirkning på den komprimerede pløjesål, der findes i pløjede marker

(Olesen et al., 2002). Til gengæld kan der opstå komprimerede lag nærmere jordoverfladen umiddelbart under den nye bearbejdningsdybde (Olesen et al., 2002). Begge typer jordbearbejdningsmetoder kan således medføre komprimering af jorden under bearbejdningsdybde. Dertil kommer, at anvendelsen af tungt maskiner kan bevirke, at trykpåvirkningen forplanter sig længere ned gennem jorden afhængig af dæktryk, dækstørrelse og vægt af udstyr samt af jordens tekstur og fugtighedsgrad.

Disse forhold vil påvirke de fysiske forhold i jorden, bl.a. kan de nedsætte og ændre vandtransporten. Dette kan have betydning for tabet af fosfor. Dels kan tilstedeværelsen af en pløjesål eller anden form for komprimeret jordlag bevirke øget horisontal vandbevægelse med deraf følgende øget risiko for erosionstab af fosfor. Dels kan nedsivningen af vandet gennem jorden tvinges til at ske overvejende gennem større sprækker, ormegange og rodgange pga. komprimerede jordlag, hvorved også nedsivningen af opløst og partikelbundet fosfor kan øges i forhold til en jord med mere homogen afdræning.

### 3.9.2 Gødskning

Letopløseligt handelsgødningsfosfor, husdyrgødning, slam og visse affaldstyper er de hyppigst anvendte fosforgødninger i Danmark (se også afsnit 1.2). Disse gødningstyper er ret forskellige i deres sammensætning, hvilket har betydning både for gødningsfosforets omsætning og mobilitet i jorden. Også udbringningsteknik og –tidspunkt og dosering varierer for de forskellige typer af gødning, hvilket også kan have betydning for risikoen for tab af fosfor til vandmiljøet.

Letopløseligt handelsgødningsfosfor opløses hurtigt i regnvand og jordvæske, og dette fosfor vil derfor indgå i jordens fosforpulje forholdsvis kort tid efter, at det er blevet opløst. Normalt bredspredes handelsgødning på jordoverfladen ved vækstsæsonens start. Medmindre jordoverfladen er meget våd kommer gødningsfosforet først rigtigt i kontakt med jorden, når der kommer nedbør. Ved store nedbørshændelser, før handelsgødningen er kommet i kontakt med jorden, vil der være risiko for direkte gødningstab via overfladeafstrømning og nedvaskning gennem makroporer til dræn. Da opløst uorganisk fosfor hurtigt reagerer med den omliggende jord, vil gødningsfosforet især berige jorden i umiddelbar nærhed af gødningspartiklen. Lokal berigelse af jorden med fosfor kan udnyttes ved at placere gødning i strenge under jorden tæt på den spirende afgrøde. Dette kan fremme udnyttelsen af den tilførte gødning. Den lokale berigelse med fosfor i jordoverfladen ved overfladeudbringning vil aftage med tiden, specielt i forbindelse med pløjning og harvning.

Planteernæringsmæssigt sidestilles husdyrgødningsfosfor med letopløseligt handelsgødningsfosfor, da det organisk associerede fosfor i husdyrgødning relativt hurtigt frigives, når husdyrgødningen tilføres jorden. Husdyrgødning udbringes i dag hovedsageligt som gylle lagt ud med slæbeslanger eller ved nedfældning. Udbragt på bar mark skal husdyrgødningen indarbejdes i jorden inden for 6 timer efter udbringning for at mindske ammoniakfordampningen. Denne indarbejdning i jorden nedsætter også risikoen for direkte tab af husdyrgødningsfosfor til vandmiljøet. Meget tyder på, at husdyrgødningsfosfor er mere mobilt og fordeler sig til en større dybde i landbrugsjorden end handelsgødning (Stephenson & Chapman, 1931; Chardon et al., 1997; Eghball et al., 1996), og nye undersøgelser viser, at husdyrgødningskvalitet og oprindelse også kan påvirke mobiliteten i jorden i



et vist omfang (Rubæk et al., 2002; Heckrath et al., 2002b). I disse transportforsøg med uforstyrrede jordkolonner tilført husdyrgødning af forskellig kvalitet var der en tendens til, at husdyrgødning fra svin og kvæg, der var fodret med henblik på lav udskillelse af fosfor i gødningen, gav mindre fosfortab end de tilsvarende gødninger med traditionel fodringsstrategi.

Fosfor tilført med spildevandsslam kan være mindre opløseligt og tilgængeligt på kort sigt, specielt med de nyere fældningsteknikker hvor man bruger jern og aluminium ved fældning af fosfor i rensningsanlæggene (Penn & Sims, 2002), men på lidt længere sigt vil dette fosfor formentlig også indgå i jordens fosforpulje på lige fod med andet gødningsfosfor. Da danske jorde generelt har en god status med hensyn til plantetilgængeligt fosfor, og da slammet oftest tilføres i store mængder i udbringningsåret, men med flere års mellemrum giver dette ikke nogle umiddelbare problemer for afgrødernes fosforforsyning.

Der er risiko for direkte tab af gødning, der ligger på overfladen, via afstrømning på skrånende arealer eller på arealer med risiko for hurtig afstrømning via makroporer til kunstige dræn, hvis der kommer voldsom regn kort tid efter udbringning (se f.eks. Djodjic et al., 2000; Magid et al., 1999). Efterårsudbringning af fosforgødning kan derfor være risikabelt, specielt hvis gødningen efterlades på jordoverfladen. Hurtig indarbejdning af gødningen vil sikre en hurtigere og bedre fordeling af gødningsfosforet i jorden og modvirke direkte gødningstab via både overfladeafstrømning og nedvaskning via makroporer til dræn (Djodjic et al., 2002). Ved reduceret jordbearbejdning er opblandingen af jord og gødning væsentligt mindre, og det øverste jordlag vil derfor blive relativt mere fosforberiget end ved opblanding til normal pløjedybde. Dette kan være u hensigtsmæssigt, da den berigede overjord vil kunne frigive mere fosfor til tab via makroporer til dræn, overfladeafstrømning og erosion.

Græssende køer, frilandsgrise mv. efterlader også gødning på markerne, og de fordeler det ujævnt over marken. Uhomogen fordeling af husdyrgødning kan føre til dannelse af særlige risikoområder inden for marken, hvor der findes store mængder fosfor i jorden (Eriksen & Kristensen, 2001). Findes der, eller opstår der, en transportvej fra et sådant hotspot til vandmiljøet, kan dette lokalt føre til forhøjede fosfortab. En u hensigtsmæssig driftsform kan også være græssende køer på marker med risiko for makroporestrømning til dræn (Jensen et al., 2000; Magid et al., 1999). Ligeledes kan græsning på skrånende arealer eller lavtliggende, vandløbsnære arealer bevirke øget tab direkte fra den afsatte gødning.

Handelsgødningsfosfor tildeles typisk årligt i mængder, der er afpasset efter jordens fosforstatus og afgrødens behov, hvorimod slam typisk tildeles i større doser med 3 års mellemrum. Tabsrisikoen ved større tildelinger med længere tids mellemrum anses for at være lidt større end ved tildeling af samme dosis ved årlige tildelinger (Ulén & Mattsson, 2003). Udbringning under tørre forhold og grundig indarbejdning af gødningen vil dog mindske tabsrisikoen (Ulén & Mattsson, 2003; Djodjic et al., 2002) og kan i nogen grad modvirke den ekstra risiko, der er forbundet ved større doser tildelt med f.eks. 3 års mellemrum.

### *Slamanvendelse i landbruget*

De kommunale rensningsanlæg er gennem de senere år blevet kraftigt udvidet, og produktionen af spildevandsslam er steget. En væsentlig del af slammet er blevet genanvendt som gødning i landbruget. Udvidelserne af rensaneanlæggene har i væsentlig grad været betinget af de skærpede krav til udledning af fosfor i recipienterne, som er blevet implementeret i forbindelse med de forrige vandmiljøplaner. Den seneste opgørelse fra Miljøstyrelsen over slammængder m.v. vedrører 1999. Dette år blev der på danske kommunale rensaneanlæg produceret omkring 160.000 t TS slam (målt som tons tørstof). Af disse blev knap 100.000 t TS genanvendt som gødning på landbrugsjord; det svarer til ca. 60%. Det øvrige slam blev disponeret ved forbrænding, deponering eller ved forarbejdning til andre produkter.

På rensaneanlæggene fjernes spildevandets indhold af fosfor typisk ved en kombination af en biologisk indbygning af fosfor i mikroorganismer og en efterfølgende kemisk fældning, hvor fosforet flyttes fra spildevandet og over i slammet. De skærpede krav til rensning af spildevandet har medført, at mængden af fosfor i slammet fra rensaneanlæggene er steget tilsvarende. Mange private virksomheder med egne rensaneanlæg har også genanvendt deres slamprodukter som gødning i landbruget. Blandt de største og mest kendte virksomheder med egne slamprodukter kan nævnes Novogruppen med "Novogro" og Cheminova med "Cheminova-fosfat".

Det gennemsnitlige indhold af fosfor i det kommunale spildevandsslam, der blev udbragt på landbrugsjord i 1999, var ca. 3,1% - svarende til ca. 3.000 tons fosfor om året. Fosforindholdet i Novogro-slammet er i 2002 oplyst at være 565 tons fosfor, medens indholdet i Cheminova-fosfatet samme år er opgivet til 1.040 tons fosfor (til sammenligning er den totale fosformængde i den danske husdyrgødning beregnet til ca. 55.000 tons i år 2000).

Udbringning af kommunalt spildevandsslam og tilsvarende slamprodukter fra private virksomheder er reguleret af Slambekendtgørelsen (Miljøministeriet, 2003). Én af reguleringerne i bekendtgørelsen vedrører doseringen af fosfor. Der er fastsat en maksimal tilladelig dosering på 90 kg fosfor pr. ha hvert tredje år. Anvendelsen af slammet i landbruget er primært styret af dette fosforvilkår. Det er da også fosforindholdet, der er det økonomiske incitament for landmanden til at modtage slammet.

Arealbehovet til spredning af det kommunale spildevandsslam kan for 1999 beregnes til 330.000 hektar pr. år, eller i alt 110.000 hektar årligt over en 3-års periode, idet arealerne kun må gødes med denne fosfordosering én gang hvert tredje år. Tilsvarende er arealbehovet for Novogro-slammet knap 20.000 hektar pr. år (beregnet ud fra en årlig dosering på maks. 30 kg pr. ha), og arealbehovet for Cheminova-fosfatet kan tilsvarende beregnes til ca. 35.000 hektar.

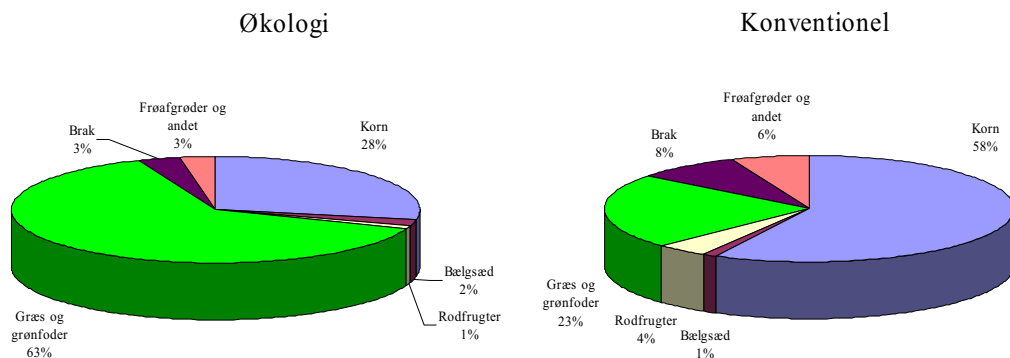
Det har gennem de seneste mange år været Miljøministeriets officielle politik, at en genanvendelse af slammet fra de kommunale rensaneanlæg som gødning i landbruget anses for den mest miljørigtige. Denne politik har bl.a. været begrundet i ønsket om at udnytte slammet som fosforkilde for på den måde at substituere importen af fosforholdige handelsgødninger, da fosfor er en ikke-fornybar ressource. Miljøstyrelsen har gentagne gange skærpet grænseværdier for slammets tilladelige ind-

hold af tungmetaller og miljøfremmede stoffer. Opstrammerne er sket for at sikre, at anvendelsen af slammet ikke har kunnet give anledning til frygt for forurening af jord, grundvand eller afgrøder. På trods af denne officielle slampolitik har flere og flere kommuner fravalgt den landbrugsmæssige genanvendelse af slammet. Dette skyldes dels faldende efterspørgsel efter slammet, dels at kommunerne ikke kan få garantier for en lang og stabil afsætning til landbruget.

### 3.9.3 Økologisk jordbrug

I 2001 blev 6,3% af det danske landbrugsareal drevet efter reglerne for økologisk jordbrug (Plantedirektoratet, 2002). Økologisk jordbrug adskiller sig fra konventionelt jordbrug på en række punkter, som har konsekvenser for udnyttelsen og tabet af fosfor. Her gennemgås følgende af de vigtigste punkter: 1) Afgrødesammensætning og sædskifte, 2) Udbytteneiveau og fraførsel af fosfor fra jordbrugssystemet, 3) Harmonikrav til udspredding af husdyrgødning og dermed tilførsel af fosfor til jordbrugssystemet, og 4) Krav om, at særlige hjælpestoffer og teknologier ikke må anvendes.

Arealanvendelsen på økologiske bedrifter er generelt præget af en stor arealandel med kløvergræsmarker, andre grønfoderarealer samt arealer med udlæg til disse (figur 3.29). Disse marker er som oftest flerårige. Der vil derfor typisk være færre ompløjninger og flere grønne marker på økologiske bedrifter end på konventionelle, hvor der er en større arealandel med enårige afgrøder såsom korn, rodfrugter, bælgssæd og raps, der sorterer under kategorien frøafgrøder og andet på figur 3.29. Dette kan medvirke til mindsket erosion og dermed et mindre tab af fosfor i økologisk end i konventionelt landbrug (jf. afsnit 3.10 om virkemidler).



**Figur 3.29 Afgrødesammensætningen på økologiske og konventionelle bedrifter 2001 (Danmarks Statistik, 2002).**

Udbytteneiveauet i økologisk jordbrug er i forhold til konventionelt jordbrug ca. 25% lavere for korndyrkning og 15% lavere for græs og roer (Halberg & Kristensen, 1997). Bortførslen af fosfor med afgrøderne er derfor også mindre, idet visse undersøgelser desuden tyder på, at der er et mindre fosforindhold i økologiske end i konventionelle afgrøder (Askegaard & Mikkelsen, 1995), mens andre undersøgelser på økologiske kvægbrug ikke viser signifikant forskellige fosforindhold i afgrøderne.

Tilførslen af fosfor begrænses i økologisk jordbrug dels af, at der ikke må tilføres fosfor i form af handelsgødning, og dels af, at udbringningen af husdyrgødning er begrænset til 1,4 dyreenhed er pr. ha. Desuden er der begrænsninger på, hvor meget konventionel husdyrgødning, der må importeres, og i egne med få økologiske husdyrbedrifter betyder dette, at specielt gødningsimporten til økologiske planteavlsbedrifter begrænses yderligere. Fra 2002 gælder harmonikravet på 1,4 dyreenheder pr. ha også for konventionelle bedrifter, dog kan kvægbedrifter og fjerkræ/pelsdyrbedrifter tilføre husdyrgødning fra 1,7 dyreenheder pr. ha og i visse tilfælde op til 2,3 dyreenheder pr. ha (Plantedirektoratet, 2002).

Forskellene på til- og fraførsel af fosfor kan lede til en ændret ophobning og potentielt tab af fosfor i økologisk i forhold til konventionelt jordbrug. Således viser balanceberegninger på studielandbrugene 1997 - 2000, at der på de konventionelle kvæg-, svine- og planteavlsbrug i gennemsnit tilførtes 127%, 173% og 124% af den mængde fosfor, der fjernedes med afgrøderne (Dalgaard & Nielsen, 2001). Tilsvarende opgørelser på de økologiske studiebrug viste generelt et lavere merforbrug på økologiske end på konventionelle kvægbrug, men et større merforbrug på økologiske svine- og planteavlsbrug. De største merforbrug var på de bedrifter, hvor der blev udbragt mest husdyrgødning pr. arealenhed. F.eks. udbringes der generelt mere husdyrgødning på økologiske planteavlsbrug end på konventionelle planteavlsbrug, men for konventionelle og økologiske planteavlsbrug med samme niveau af husdyrgødning er der ikke en signifikant forskel på fosformerforbruget. Teoretiske beregninger på økologiske modelbrug viser tilsvarende små fosformerforbrug i økologisk kvægbrug og planteavl (Eriksen et al., 1995). Ved økologisk svineproduktion stilles krav til frilandsarealer, som kendetegnes ved et stort potentiale for tab af næringsstoffer såsom fosfor. Merforbruget af fosfor på økologiske svinebedrifter var derfor væsentlig højere end på konventionelle svinebedrifter, med mindre disse også blev drevet med dyrene på friland. Det samme forhold vil være gældende ved fjerkræproduktion. Dyr på friland og måske specielt frilandsgrise kan også forårsage en meget uhomogen fordeling af husdyrgødningen oftest i den retning, at der, hvor der tilføres meget, bortføres der samtidig meget lidt med afgrøden. Desuden har jorden i sådanne områder en tendens til at blive sammentrædt, hvilket kan være meget uheldigt for risikoen for næringsstofftab fra arealer med fritgående dyr (Eriksen & Kristensen, 2001).

Foruden forbrug af handelsgødning og pesticider forbyder det økologiske regelsæt anvendelsen af bl.a. industrielle aminosyrer, genmodificerede organismer og spildevandsslam. Effekten af de to første begrænsninger er diskuteret ovenfor, idet forbudet mod pesticider primært påvirker fosforudnyttelsen gennem et reduceret udbyttepotentiale i planteavlen. Forbudet mod aminosyrer er begrænsende ved økologisk svineproduktion, men da denne produktionsgren p.t. ikke er særlig udbredt, er den generelle effekt mht. fosfor lille. Derimod kan forbudet mod genmodificerede organismer i de kommende år betyde, at økologisk jordbrug ikke kan implementere de samme forbedringer mht. fosforudnyttelsen som det konventionelle jordbrug. Disse mulige forbedringer diskuteres andetsteds i denne rapport (afsnit 2.3.6). Endelig vil forbudet mod anvendelse af spildevandsslam som fosforkilde i økologisk jordbrug betyde, at der isoleret set tilføres mindre fosfor til de økologiske jordbrugssystemer. Imidlertid ændres den totale mængde spildevandsslam jo ikke herved, og hvis forbudet betyder, at slammet i stedet udbringes på jorde, hvor det potentielle fosfortab er større end ved økologisk jordbrug, betyder forbudet en dårligere udnyttelse af dette fosfor og vice versa. Øko-

logiske brug kan dog i fremtiden tænkes at ville aftage spildevandslam og lignende, såfremt kvaliteten af disse produkter forbedres.

Konklusionen af ovenstående betragtninger er, at økologisk jordbrug bidrager til at forbedre fosforudnyttelsen i landbruget og sænker tabet af fosfor til miljøet. Imidlertid er der tale om marginale effekter, som alle relaterer sig til det katalog af virkemidler, der gennemgås i det kommende afsnit. Det fremtidige potentiale af disse virkemidler afhænger bl.a. af den teknologiske udvikling. Hvis økologisk jordbrug i samme omfang som det konventionelle landbrug vil være i stand til at drage nytte af nye teknologier, og hvis målrettede tiltag til at reducere fosfortabet implementeres i samme omfang på økologiske som på konventionelle bedrifter, vil økologisk jordbrug således fortsat kunne tjene som instrument til at forbedre fosforudnyttelsen i landbruget og sænke tabet af fosfor til miljøet.

### **3.10 Virkemidler og deres effekt**

*Jørgen F. Hansen, Gitte Holton Rubæk og Brian Kronvang*

I den følgende gennemgang af virkemidler til reduktion af fosfortabet fra landbrugsarealer til vandmiljøet er disse inddelt i to overordnede grupper: *Generelle virkemidler* og *Virkemidler i risikoområder*. Flere af de nedenfor beskrevne virkemidler vil kunne kombineres, men effekterne vil ikke nødvendigvis kunne adderes ved anvendelse på det samme areal. Ved anvendelse af forskellige virkemidler på forskellige arealer vil der imidlertid givetvis kunne opnås en additiv virkning, fordi de enkelte virkemidlers effekt i et givent område i høj grad vil afhænge af de lokale forhold. For at opnå en effekt, der er hensigtsmæssig både økonomisk og miljømæssigt, bør valg af virkemidler – specielt dem der sættes ind med i risikoområder – ske på baggrund af de lokale forhold. Den ideelle strategi på fosforområdet opnås formentlig ved anvendelse af generelle virkemidler til begrænsning af fosforophobningen og forbedret fordeling af fosfor på hele landbrugsarealet kombineret med en særlig indsats mod fosfortabet fra risikoarealer.

I vurderingen af virkemidlernes effekt er disse betragtet isoleret, dvs. i en ”alt andet lige” situation, og der er ikke taget hensyn til eventuelle vekselvirkninger med andre virkemidler eller tabspåvirkende faktorer, eksempelvis den situation, at anvendelse af et virkemiddel påvirker effekten af et andet virkemiddel og dermed også den samlede virkning af de to virkemidler. Endvidere er der i vurderingen af effekten af et virkemiddel taget udgangspunkt i nu-situationen, dvs. at effekten på fosfortabet skal ses i forhold til det nuværende tab.

*Generelle virkemidler* er foranstaltninger, som kan anvendes over hele landet, og med virkning for alle bedrifter. Endvidere er det virkemidler, hvor der sker en reduktion i fosfortilførslen til jorden og en bedre fordeling af fosfor på landbrugsarealet. Tidshorisonten for virkningen på fosfortabet og dermed på miljøet vil generelt være lang, og samtidig er effekten af virkemidlerne på tabet særdeles vanskelig at kvantificere. Disse usikkerheder til trods skønnes det dog, at der på længere sigt vil være en sikker effekt af virkemidlerne. Det forudsættes dog, at man i forbindelse med en reduktion af fosfortilførslen opnår en bedre fordeling af fosforet over landbrugsarealet og en negativ balance mellem til- og fraførsel på arealer, hvor der allerede er ophobet store mængder fosfor. Virkemidler-

ne vil derimod ikke løse akutte miljøproblemer forårsaget af for store fosforudledninger til vandmiljøet. Det må endvidere forudses, at effekten af en reduceret fosfortilførsel til jorden vil variere fra sted til sted afhængig af bl.a. fosformætningsgraden i jorden, jordbundsforhold, nærhed til sårbare vandområder mv. Der er et betydeligt behov for yderligere undersøgelser på dette område.

*Virkemidler i risikoområder* tænkes anvendt i udpegede områder. Disse virkemidler er i de allerfleste tilfælde virkemidler med en kort tidshorizont for effekt på fosfortabet. De fleste vil kunne anvendes, hvor der er behov for en indsats her og nu. Næsten alle virker ved på kort sigt at hindre en udledning af fosfor til vandmiljøet, hvorimod kun nogle medfører en reduktion i eller ophør af fosfortilførslen til jorden.

Virkemidlerne er yderligere grupperet i fire kategorier:

- Driftsmæssige foranstaltninger
- Produktionsreguleringer
- Arealændringer
- Miljøforvaltning

Ved *driftsmæssige foranstaltninger* forstås handlinger, som foretages i forbindelse med den daglige drift af ejendommen, dvs. valg af jordbearbejdningsmetoder, gødskning, afgrødevalg, fodringspraksis mv.

Virkemidler i kategorien *produktionsreguleringer* sigter mod at påvirke og regulere produktionen, således at der indbygges miljøhensyn i produktionsmetoderne. Reguleringerne kan ofte have væsentlige afledte effekter på produktion og strukturudvikling.

I kategorien *arealændringer* indgår foranstaltninger, som medfører midlertidige eller langvarige, evt. permanente, ændringer i arealanvendelsen.

For virkemidler grupperet under *miljøforvaltning* antages, at disse ofte initieres for en gruppe af landmænd og i tæt samarbejde mellem landmænd og forvaltning eller på forvaltningens initiativ.

### 3.10.1 Generelle virkemidler

De generelle virkemidler, som er skitseret nedenfor, sigter alle mod at nedsætte tilførslen og optimere fordelingen af det fosfor, der tilføres det samlede landbrugsareal. Det overordnede virkemiddel kunne derfor være ”behovsbetinget fosfortilførsel”. De øvrige generelle virkemidler, der er foreslået, kan på forskellig vis bidrage til, at den behovsbetingede tilførsel vil kunne realiseres på kortere eller længere sigt. Ved ”behovsbetinget fosfortilførsel” forstås her en tilførsel, som tager hensyn til jordens fosforpulje, således at tilførslen reguleres ned, evt. helt undlades, på jorde med højt indhold af plantetilgængeligt fosfor og reguleres op på jorde med lav fosforstatus.

Det er især vanskeligt/umuligt at kvantificere effekten af de generelle langsigtede virkemidler, fordi fosfortabet opstår i et samspil af komplekse processer med store variationer i tid og rum. At tabet samtidig er forholdsvis lille set i forhold til de store mængder fosfor, der er i kredsløb i landbrugs-

områderne, vanskeliggør en kvantificering yderligere. Forudsætningen om ”alt andet lige” er specielt væsentlig ved vurderingerne af den langsigtede effekt af en mindsket fosfortilførsel til landbrugsarealerne og en bedre fordeling af fosforet over landbrugsarealet. Effekten heraf må vurderes under forudsætning af uændret klima, drift, afgrøder etc., hvilket er vigtigt, da en beskedent, men sikker effekt af en generel sænkning af fosforstatus i dansk landbrugsjord over de næste årtier, meget vel vil kunne overskygges af eventuelle negative effekter af ændringer i klima, drift eller sædskifte. Samtidig skal man huske, at dyrkningsbidragets størrelse varierer meget fra år til år, og at der er store usikkerheder forbundet med fastsættelsen af dyrkningsbidraget, hvilket yderligere gør det vanskeligt at monitorere ændringer i dyrkningsbidraget (se afsnit 3.4).

Den isolerede effekt på lang sigt af balance mellem til- og fraførsel af fosfor på nationalt plan vurderes under ovennævnte forudsætninger at være en fastfrysning af fosfortabet, som det er nu. Da en balancesituation imidlertid formentlig automatisk vil udløse en forbedring i udnyttelsen og fordelingen af fosforet over landbrugsarealet, skønnes effekten derfor på det lange sigt at være en lille reduktion i fosfortabet, men det vurderes ikke muligt at kvantificere denne. Tilsvarende skønnes det, at hvis man også fremover har et overskud på nationalt plan, vil dette – alt andet lige – på sigt øge fosfortabet. En decideret negativ balance vil tilsvarende mindske fosfortabet på lang sigt, og kombineres negativ balance med en mere hensigtsmæssig fordeling, vil effekten forøges. Det skal her påpeges, at en behovsbetinget fosfortilførsel vil medføre negativ balance på jorde med højt indhold af plantetilgængeligt fosfor og mulighed for at have positiv balance på jorde med lav fosforstatus. Der foreligger ikke tilstrækkeligt grundlag for at vurdere/sætte tal på størrelsen af ovennævnte ændringer i fosfortabet.

#### *Behovsbetinget fosfortilførsel*

Tilførsel efter planternes behov indebærer, at der ved gødsningen tages hensyn til jordens fosforstatus. På jorde med højt indhold af plantetilgængeligt fosfor bør der tilføres mindre fosfor, end der bortføres med afgrøderne, således at der tæres på jordens fosforreserver, evt. kan fosforgødsning helt undlades i nogle år. På langt sigt vil det nedsætte potentialet for tab af fosfor fra jorden i de pågældende marker og forbedre udnyttelsen af næringsstoffet i planteproduktionen. På kort sigt vil risikoen for overfladisk afstrømning eller tab ved erosion af tilført gødningsfosfor (handels- eller husdyrgødning) reduceres. Virkemidlet er oplagt at bruge i risikoområder, men bør tilstræbes overalt, da der dyrkningsmæssigt ikke kan argumenteres for ophobning af fosfor i jorden ud over, hvad afgrøderne har brug for. I mange situationer tilføres der mere fosfor med husdyrgødning, end afgrøderne har behov for, bl.a. fordi tilførsel sker efter afgrødernes N-behov. En behovsbetinget fosfortilførsel kan medføre behov for lokal supplerings af husdyrgødningen med handelsgødnings-N eller øget anvendelse af bælgplanter f.eks. i økologisk jordbrug, men må nationalt set være N-neutral. Alt andet lige vil den generelle effekt af behovsbetinget fosfortilførsel derfor være nedsat fosfortilførsel til landbrugsjorden, en mere hensigtsmæssig fordeling af husdyrgødningsfosforet, således at man reducerer ophobningen på arealer, der allerede har en høj fosforstatus, og en forbedring af landbrugsgets overordnede fosforudnyttelse. En effekt på fosfortabet forventes først at manifestere sig på længere sigt, da ændringerne i jordens fosforpulje vil være relativt små på det korte og mellemlange sigt. Virkemidlet vil generelt kræve øget udsprængningsareal for husdyrgødningen, og det må forventes, at effekten vil være størst i husdyrintensive egne.

### *Fastsættelse af normtal for fosfortilførsel til afgrøder*

En fastsættelse af normtal for fosforgødskning, som det kendes fra regulering af kvælstofanvendelsen i landbruget, vil skabe bedre balance mellem tilførsel af og behov for fosfor i planteproduktionen. Nettotilførslen til jorden vil reduceres, og fosfor fordeles bedre, og på langt sigt må der forventes en reduktion i tabet af fosfor. Fastsættelse af fosfornormtal kan f.eks. anvendes til at gennemføre en behovsbetinget fosforgødskning i landbruget, når der ud over afgrødernes optagelse tages hensyn til jordens pulje af fosfor ved hjælp af en passende indikator, f.eks. fosfortallet. Fosfornormtal vil i mange tilfælde medføre krav om øget udspretningsareal og dermed øget behov for omfordeling af husdyrgødningen. Krav til udspretningsareal kan imidlertid reduceres af en bedre udnyttelse af fosfor i foder og et deraf følgende nedsat fosforindhold i gødningen. Fastsættelse af normtal kan forventes at fremme udnyttelsen af fosfor i foder, og det vil evt. også fremme udviklingen på gylleseparationsområdet.

### *Reduceret fosforindhold i husdyrgødningen*

Husdyrgødningens fosforindhold kan reduceres ved en bedre udnyttelse af fosfor i foderet. Ved gødskning med husdyrgødning med reduceret fosforindhold efter gødningens indhold af kvælstof reduceres fosfortilførslen til afgrøderne automatisk. Ved en reduktion af fosforindholdet i husdyrgødningen opnår man derfor et for de fleste afgrøder mere harmonisk forhold mellem kvælstof og fosfor. Der må principielt forventes samme virkning på fosfortabet som beskrevet ved behovsbetinget fosfortilførsel, idet tilførsel af fosfor reduceres, og overskudstilførsel minimeres. Effekten vil være afhængig af, hvor meget fosforindholdet i husdyrgødningen reduceres.

Blandt de afledte effekter af et reduceret fosforindhold i gødningen kan peges på ændrede betingelser for separation af gylle. En bedre foderudnyttelse af fosfor kan reducere behovet for anvendelse af separationsteknikker, idet spredningsarealet for optimal fosforudnyttelse i afgrøderne og dermed transportbehovet formindskes. Det er også muligt, at effektiviteten af de forskellige separationsteknikker på sådanne fremtidige lav-fosfor-husdyrgødninger vil afvige fra separationseffektiviteten på typiske høj-fosfor-husdyrgødninger. Ligeledes er det muligt, at mobiliteten i jord af husdyrgødningsfosforet er mindre for lav-fosfor-husdyrgødninger end den er for høj-fosfor-husdyrgødninger.

En anden mulighed for at reducere husdyrgødningsfosfor er gennem reduktion af husdyrbestanden. Dette vil med sikkerhed reducere fosformængden i landbruget (forudsat, at nedgangen ikke erstattes af handelsgødningsfosfor), men vil også have væsentlige sideeffekter bl.a. af økonomisk art. Principielt er det ikke produktionens størrelse, men derimod mængden af fosfor, der udbringes på jorden, som har betydning for fosfortabet. Det vil sige, at en reduktion i fosfortilførslen må forventes at have samme effekt på tabet, uanset om dette sker ved en reduktion i husdyrgødningsfosfor eller ved en reduktion i handelsgødningsfosfor eller evt. slamfosfor.

### *Gødskningsteknologi*

Normalt bredspredes handelsgødning, og husdyrgødning udlægges i strenge efter gyllespredere med slæbeslanger eller bredspredes (dybstrøelse og staldgødning). Uheldige omstændigheder i forbindelse med udbringning kan medføre enkeltstående større tab, f.eks. ved overfladeafstrømning på skrånende areal ved stor nedbør umiddelbart efter gødningsudbringning. Hurtig nedbringning i jor-



den vil modvirke dette, evt. nedfældning af gylle. Placering af handelsgødningsfosfor i strenge tæt på afgrøderækkerne kan evt. reducere den nødvendige mængde gødning, fordi koncentrationen øges tæt på planterødderne. Disse teknikker kan kræve udvikling af ny teknologi og desuden forårsage, at udbringningsarbejdet øges, samt at energibehovet evt. stiger (gylledfældning). En anden mulighed for alternativ gødningsstrategi – som dog ikke reducerer behovet – er udbringning af fosfor med f.eks. tredobbelt mængde hvert tredje år.

Præcisionsjordbrug, dvs. variabel gødningstilførsel til den enkelte mark afhængig af bl.a. udbytte-, jordtype- og næringsstofvariationer over marken, kan medføre en mere optimal gødningstilførsel til afgrøderne og et reduceret tab. Fordelene er potentielt størst på husdyrbrug, idet akkumuleringen af fosfor varierer inden for en mark pga. bl.a. ujævn fordeling af gødningen ved udbringning og som følge af græssende dyr. Desuden har også gamle, slettede markskel og udbyttevariationer betydning for variationer i jordens fosforindhold. Ved at tage hensyn hertil ved tildelingen af handelsgødning kan den samlede gødningstilførsel optimeres og reduceres.

### *Gylleseparation*

Ved gylleseparering adskilles gyllen i fraktioner med forskellig koncentration af næringsstoffer, af forskellig volumen og med forskellig tørstofindhold. Ved en første adskillelse i en fraktion med højt tørstofindhold og en flydende fraktion (f.eks. dekantercentrifugering) indeholder den ”faste” fraktion 70 - 80% af gyllens fosforindhold. Samtidigt sker der en opkoncentrering af fosfor og en volumenreduktion, hvilket muliggør en længere transport af den fosforholdige gødning og dermed fordeling over et større areal. Virkningen heraf vil være stærkt forbedrede muligheder for at undgå overgødsning og praktisere behovsbetinget fosforgødsning, såfremt gylleseparaterne fortrænger brugen af handelsgødning (og slam). Fosforet i husdyrgødningen kan også fjernes ved kemisk fældning med jern- eller aluminiumforbindelser i stil med den fældning, der foretages i rensningsanlæg. Kemisk fældet fosfor vil typisk være mindre opløseligt i jorden (Maguire et al., 2001). En sideeffekt af separering kan være behov for supplering med andre næringsstoffer, fordi den fosforholdige fraktion har et relativt lavt indhold af andre næringsstoffer, f.eks. kvælstof. Konsekvensen heraf kan således være et øget antal arbejdsgange på det samme areal. Dette kan dog imødegås ved at tilføre f.eks. tredobbelt mængde fosfor hvert tredje år til arealet. Ved mere avancerede separeringsformer er der mulighed for efterfølgende at kombinere gødningsfraktionerne fra separeringsanlægget og derved fremstille fuldgødningsfraktioner tilpasset afgrødernes behov, hvorved gødningsudbringningen evt. kan foretages i én arbejdsgang. En anden sideeffekt af separering kan være behovet for udvikling af nye spredningsteknikker, fordi der fremkommer gødningsfraktioner med ny konsistens og med ændret koncentration af næringsstoffer. Se i øvrigt under virkemidlet: Reduceret fosforindhold i husdyrgødningen.

### *Øgede harmonikrav*

Ved at øge harmonikravene til husdyrbrug vil fosforudnyttelsen i landbruget kunne forbedres og potentialet for tab reduceres, såfremt man opnår en så stor forbedring i fordelingen af fosforet, at fosforindholdet i jorde med meget høj fosforstatus vil falde, uden at der samtidig sker store ophobninger af fosfor på andre marker. Lokalt vil behovet for supplerende kvælstofgødsning eller brug af bælgeplanter øges på husdyrbrug, idet der i nogle situationer vil opstå underforsyning med kvæl-

stof fra husdyrgødning, men nationalt set vil der ikke være øget N-behov. Transportbehovet for husdyrgødning vil øges. En yderligere afledt effekt vil være en øget efterspørgsel efter jord med stigende priser til følge samt som følge deraf et øget pres på strukturudviklingen i landbruget.

### **3.10.2 Virkemidler i risikoområder**

De virkemidler, som her foreslås til anvendelse i risikoområder, sigter næsten alle mod at reducere udledningen af fosfor til miljøet i særlige risikoområder inden for en kortere tidshorizont. Det er i de fleste tilfælde særdeles vanskeligt at kvantificere virkningen af virkemidlerne, fordi der ikke foreligger undersøgelser til støtte for en vurdering, og fordi forholdene (jordbund, topografi, arealanvendelse, driftsform, kulturtekniske foranstaltninger og evt. klima mv.) vil variere fra risikoområde til risikoområde. De bud, der i det efterfølgende er givet på effekternes størrelsesorden, er derfor skønnede og meget usikre. I mange tilfælde er det ikke vurderet muligt at give kvalificerede kvantitative bud på effekten af det enkelte virkemiddel. Ved at anvende forskellige virkemidler i forskellige områder vil den samlede virkning af flere virkemidler imidlertid kunne være stor. En anvendelse af virkemidlerne, tilpasset de lokale behov, vil således kunne give en geografisk additiv virkning for alle risikoområder.

#### ***Virkemidler baseret på driftsmæssige reguleringer***

##### ***Reduceret jordbearbejdning***

Ved reduceret jordbearbejdning flyttes jord i mindre omfang omkring på marken end ved normal jordbearbejdning. Desuden kan pløjefri dyrkning forbedre vandinfiltrationen og reducere risikoen for erosion gennem øget aggregatstabilitet, et øget system af sammenhængende dybtgående makroporer, ingen pløjesål, og øget indhold af organisk materiale i overfladen (Olesen et al., 2002). Der kan dog evt. også være en anden, modsat rettet, effekt. Ved reduceret eller ingen jordbearbejdning indarbejdes fosforholdig gødning i mindre grad eller slet ikke i jorden. Derved kan gødningen (handels- og husdyrgødning) være mere udsat for overfladeafstrømning eller transport i makroporer til dræn og evt. vinderosion. Hvilken effekt, der vil være fremherskende, vil afhænge af den konkrete situation i det aktuelle område.

Reduceret jordbearbejdning kan således ikke forventes at have en entydig positiv effekt på tabet af fosfor i alle situationer. Ofte kan der formentlig forventes en positiv effekt, men en kvantificering af effektens størrelse pr. arealenhed eller den mulige udbredelse af virkemidlet er det ikke muligt at skønne om på baggrund af den foreliggende viden. En negativ sideeffekt ved reduceret eller ingen jordbearbejdning kan være et øget herbicidbehov, fordi den mekaniske ukrudtsbekæmpelse formindskes eller helt ophører.

##### ***Jordbearbejdning og såning på tværs af skråninger***

Ved jordbearbejdning på tværs af skråningerne tilbageholdes nedbøren i længere tid på overfladen, hvorved nedsivningen i jorden kan øges, og den overfladiske vandafstrømning derved reduceres. Desuden undgås især kørespor, men også afgrøderækker op og ned af skråningerne. Herved modvirkes dannelsen af afstrømningspassager, hvor vandstrømmen kan akkumuleres. Dyrkningsprincippet anvendes i andre lande med betydelig erosionsrisiko, men der er ikke tilstrækkeligt grundlag for en kvantificering af virkemidlet under danske forhold. En ulempe ved

virkemidlet er, at det på stærkt skrånende arealer kan være vanskeligt at foretage jordbearbejdningen på tværs af skråningen, eller direkte risikabelt pga. faren for, at traktoren vælter.

#### *Unklade kørespor i afgrøder, der sås på langs ad skråninger*

Ved at unklade kørespor undgås at fremme en mulig passage for koncentration af vandstrømme ned ad skråninger og dermed begyndende rilledannelse. I køresporene vil der ikke være plantevækst, og desuden vil der ofte være en mere fast og jævn jordbund, som kan bevirke, at vandet samles og ledes ad sporene. Et alternativ til at unklade køresporene kan være at bryde disse op og gøre dem ujævne i forbindelse med såning af afgrøden, således at der skabes bedre mulighed for infiltration af vandet, hvorved overfladetransporten hæmmes. Der er ikke grundlag for at vurdere effekten af dette virkemiddel, men baseret på erfaringer med rilledannelse må der forventes en vis effekt.

#### *Direkte såning af vintersæd*

Ved direkte såning af vintersæd i en stubmark efterlades en ujævn markoverflade med stub- og planterester fra den foregående afgrøde. En ændring af jordbehandlingsstrategien vil i dette tilfælde med ret stor sikkerhed kunne reducere et muligt tab af fosfor ved erosion og overfladeafstrømning. Det er ikke muligt at kvantificere effekten af virkemidlet, men det må formodes, at denne er mindre end den usikkert skønnede effekt af at unklade vintersædsdyrkning (se nedenfor). Sideeffekter af virkemidlet kan på nogle jordtyper og under visse klimatiske betingelser muligvis være et forringet såbed med deraf følgende ringere fremspiringsbetingelser for planterne til følge. Virkemidlet kan medføre øget behov for ukrudtsbekæmpelse.

#### *Udelukke vintersæd på erosionstruede arealer*

Dyrkning af vintersæd giver markoverflader med et temmeligt homogent mikrorelief. På skrånende arealer kan dette medføre betydelig risiko for erosion og overfladeafstrømning, i ekstreme tilfælde med egentlige, dybe erosionsrender til følge. Årsagen er et svagt plantedække i efterår og vinter kombineret med den homogene markoverflade. Vintersædsarealer udviser større erosionsrisiko end stort set alle andre former for arealanvendelse, inkl. bar jord. Ophør af vintersædsdyrkning på arealer med høj erosionsrisiko vil derfor med sikkerhed reducere tabet af fosfor ved overfladeafstrømning og erosion. Der findes ikke danske målinger, som umiddelbart kan anvendes til generel kvantificering af fosfortabet fra erosionsudsatte vintersædsmarker. På grundlag af tabel 3.21 kan et gennemsnitligt erosionstab af partikulært og opløst fosfor fra erosionsrisikoområder vurderes til 0,06 - 0,25 kg fosfor pr. ha pr. år. Antages dette at gælde for vintersædsmarker også, vil effekten ved at erstatte vintersæd med ubehandlet stub eller vedvarende græs på erosionstruede arealer være en tilsvarende reduktion i fosfortabet.

En evt. negativ sidevirkning af dette virkemiddel kan være behovet for at etablere andre afgrøder til optagelse af kvælstof om efteråret med henblik på opfyldelse af kravet om grønne marker. Alternativt kunne der tænkes anvendt dyrkningsmetoder, som efterlader en mere ujævn markoverflade. Dette kan dog give problemer for den senere pleje og høst af afgrøden. En anden negativ sidevirkning ved at unklade dyrkning af vinterafgrøder er, at risikoen for vinderosion kan øges på udsatte steder, fordi der ikke er en afgrøde på markerne i en kritisk periode om foråret. Dette vil netop ofte være en periode, hvor en tør jordoverflade er fundet pga. jordbearbejdningen, og vinderosionsrisi-

koen derved yderligere er øget. Afgrøder, som dækker jorden fra det tidlige forår, vil alt andet lige reducere risikoen for vinderosion.

#### *Vedvarende græs*

Vedvarende græs vil være en sikker og effektiv foranstaltning mod tab af fosfor ved erosion og overfladeafstrømning. Denne dyrkningsform kombinerer et effektivt afgrødedække med gode muligheder for infiltration af nedbøren i jorden og medfører dermed reduceret overfladetransport af vand og materiale. I femårige danske undersøgelser er der således ikke fundet erosion på græs (eller stubmarker) (afsnit 3.4.5). Dyrkningsformen vil dog formentlig ofte være vanskeligt at indpasse i moderne landbrugsdrift på svine- og planteavlbrug. Effekten over for erosionsbetinget tab af fosfor kan sammenholdes med vurderingerne under unkladelse af vintersædsdyrkning. Man skal dog i de konkrete situationer også være opmærksom på, at den større infiltration og de forbedrede vilkår for dannelse af kontinuerte porer vil kunne medføre større fosfortab via nedsivning til dræn og grundvand.

Vedvarende græs vil desuden være et effektivt værn mod vinderosion i områder, hvor denne erosionsform er en trussel.

#### *Undgå gødningsudbringning på risikoarealer forud for kraftig nedbør*

Et karakteristisk træk ved fosfortabet fra landbruget er betydningen af enkeltstående tabshændelser. En af disse tabshændelser kan opstå ved kraftig nedbør umiddelbart efter gødningsudbringning på skrånende arealer eller arealer med kontakt til vandområder via dræn, hvilket kan resultere i betydelige tab af fosfor fra både handels- og husdyrgødning. Der kan formentlig også på kuperede arealer andre steder end direkte ned til vandområder være risiko for tab ved overfladeafstrømning til lavninger og efterfølgende drænastrømning ud til vandområder.

Disse tab kan modvirkes ved at unklade udbringning af gødning i risikoområder ved udsigt til kraftig regn. Da vejrudsigter er usikre, er det ikke altid muligt at forudsige, hvornår gødningsudbringning kan foregå uden risiko for overfladeafstrømning, men ved at anvende et forsigtighedsprincip bør det være muligt at forebygge nogle af de enkeltstående tabshændelser. Risiko for et større tab via overfladisk afstømning vil eksistere i en periode efter udbringning, såfremt gødningen stadig ligger på overfladen. På bar jord kan gødningen nedbringes, evt. nedfældes, hvorved tabsrisikoen reduceres. Ved udbringning i afgrøder vil plantevæksten i stigende grad dække jordoverfladen og dermed reducere risikoen for overfladisk afstrømning og samtidigt øge nedsivningen af nedbør i jorden. Det er i sagens natur umuligt at kvantificere effekten af dette virkemiddel. Blot kan anføres, at hvis nogle få store tabshændelser kan undgås, kan dette i konkrete områder formentlig have væsentlig betydning for miljøet. En negativ sideeffekt ved virkemidlet er, at ved at unklade udbringning af gylle i perioder med udsigt til regn kan ammoniakfordampningen øges pga. mere tørre vejrforhold, og fordi gødningen, ved ud kørsel på afgrødedækket jord, vil ligge i længere tid på jordoverflade og planter.

### *Flerårige non-food afgrøder*

Virkningen af disse afgrøder på erosion og overfladeafstrømning vil bl.a. afhænge af deres evne til arealdække efterår og vinter. Under danske forhold kan der især peges på to typer afgrøder, juletræer/pyntegrønt og energiafgrøder. Juletræer har i undersøgelser vist erosionsfølsomhed (Djurhuus, 2003). Brug af dækafgrøder mellem rækkerne vil dog kunne reducere erosionstab. Energiafgrøder som pil og elefantgræs kan i de første dyrkningsår muligvis ligne juletræer, men har måske senere større potentiale. Non-food afgrøder reducerer desuden behovet for næringsstoffølsomhed til de pågældende arealer i forhold til traditionelle landbrugsafgrøder, og med høst af afgrøderne fjernes der fosfor. Danske undersøgelser viser, at der med en elefantgræsafgrøde kan fjernes ca. 18 kg fosfor pr. ha, og at en pileafgrøde kan fjerne 8 - 12 kg fosfor pr. ha (Jørgensen, 2003). Andre undersøgelser antyder endvidere, at optagelsen af fosfor påvirkes af den tilgængelige mængde i dyrkningsmediet. Det er således fundet, at der med pil og røgræs tilført spildevand kan fjernes op til 38 kg fosfor pr. ha totalt og op til 27 kg fosfor pr. ha i stængler alene (Jørgensen, 2003). Der eksisterer ikke tilstrækkeligt grundlag for en kvantificering af effekten af dette virkemiddel, men det vurderes, at afgrøder som pil og røgræs efter etableringsfasen og forudsat, at der er afgrødedække over hele arealet, kan sammenlignes med brakarealer (se senere), hvad angår erosionsbeskyttelse.

### *Dyrkning af afgrøder med stort fosforbehov*

Fosfat fyto Remediering, dvs dyrkning af planter med et højt potentiale for fosfatoptagelse, der efterfølgende høstes og fjernes, udgør en realistisk strategi for effektiv reduktion af markens fosfatindhold (Holm, 2003). Denne strategi vil evt. kunne kobles med teknologier, der tillader en genanvendelse af den opsamlede fosfat.

Vores kulturplanter udviser store forskelle i deres evne til at optage og akkumulere fosfat. Afgrøder som græs, kløver og lucerne kan akkumulere mere fosfat end vårsædsafgrøderne og har desuden generelt større udbytte end kornafgrøderne. Der er ligeledes evidens for, at forskellige sorter kan variere i deres evne til at optage fosfat. Anvendelse af afgrøder, der bortfører meget fosfor, kan således forventes at øge fosforoptagelsen og dermed på sigt reducere jordens fosforindhold forudsat, at fosfortilførslen er mindre end fraførslen eller helt undlades. På lang sigt vil dette reducere potentialet for fosfortab, men effekten og det mulige omfang af virkemidlet kan ikke for nuværende kvantificeres.

Det kan således overvejes at fremme dyrkning af fosforakkumulerende afgrøder på jorde, hvor fosforbelastningen udgør en særlig risiko for nærliggende vandmiljøområder. Græs, kløver og lucerne vil efterfølgende kunne anvendes til ensilering for fremstilling af fosforholdigt dyrefoder. Alternativt vil der kunne fremstilles foderpiller efter presning. Pressesaft fra disse afgrøder udgør en næringsstofforsyning, der allerede anvendes til gødskningsformål, og i regi af Dansk Landbrugs Grovvarerelskab vil pressesaft blive anvendt som substrat for mikrobiel fermentering til fremstilling af aminosyren lysin.

### *Tilførsel af "fosforbindere" til jord*

Ved at tilføre jern- og aluminiumforbindelser til jorden kan jordens bindingskapacitet øges. Foranstaltningen vil især kunne modvirke tab af opløst fosfor fra jorden, men er næppe anvendelig over

større arealer. Anvendt meget lokalt på et risikoareal mod tab af opløst fosfor til et sårbart miljø kan metoden vise sig at være fornuftig. Kendskabet til risikoarealer af denne type er p.t. utilstrækkeligt til at pege på, hvor metoden evt. vil kunne anvendes med god effekt. Viden om effekten af ”fosforbindere” på tabet af fosfor er utilstrækkelig, og det skønnes ikke muligt på nuværende tidspunkt at vurdere effekten af virkemidlet.

### ***Virkemidler baseret på arealændringer***

#### ***Braklægning***

Ved braklægning ophører til- og bortførsler af fosfor til arealet i kortere eller længere tid afhængig af, om der er tale om braklægning, som indgår i omdriften eller permanent braklægning. Desuden er arealet bevokset i braklægningsperioden. Denne foranstaltning medfører således både et stop for fosfortilførslen og en nedsat risiko for overfladeafstrømning og erosion pga. permanent plantedække. Påvirkningen af afdræningsforholdene er ukendt, og det vides ikke, om braklægning evt. kan øge nedsivningstab af fosfor. Da der ikke fjernes en afgrøde fra arealet og dermed heller ikke fosfor, kan der ikke forventes væsentlige ændringer i den totale fosformængde i jorden. Evt. ændringer i jordens fosforstatus vil især skyldes forskydninger mellem de forskellige puljer i jorden, som igen afhænger af de aktuelle jordfysiske, -kemiske og biologiske forhold på stedet. Braklægning vil endvidere reducere udvaskningen af kvælstof, ligesom de braklagte arealer kan tjene som vildtrefugier. En sideeffekt ved braklægning kan være en forøget risiko for tab i forbindelse med ompløjning af en længerevarende brak. Ved omlægning til vedvarende brak vil der etableres et vedvarende vegetationsdække, der med tiden vil udvikle sig til krat og skov (naturlig succession). Effekten af braklægning er sparsomt undersøgt, men det må forventes, at virkemidlet kan sammenlignes med vedvarende græs.

Som en særlig form for braklægning kan foreslås kombination af afgrødedyrkning og braklægning på skrånende arealer. Dette kunne være f.eks. vintersæd afbrudt af braklægningszoner på tværs af skråningerne, ideelt anbragt langs konturlinierne. Braklægningszonerne vil ikke forhindre erosion på vintersædsarealerne men vil kunne opfange eroderet materiale fra ovenfor liggende arealer. De vil desuden opbryde lange skråninger i mindre afsnit og derved modvirke akkumuleringen af vandstrømme og rilledannelsen. Det vil være vigtigt, at de braklagte zoner er effektivt erosionsforhindrende /-begrænsende, og at de har tilstrækkelig bredde til at modstå gennembrud af zonen af det afstrømmende vand.

Det kan også overvejes, i egnede områder og situationer, at samordne udtagning af arealer af omdriften og omlægge til vedvarende brak for derved evt. at opnå en beskyttelse af vandmiljøet og tilgodese den vilde flora og fauna i sammenhængende områder (strategisk braklægning). Dette kunne f.eks. være langs sårbare vandområder (ådale) eller andre steder, hvor der er behov for en samordnet beskyttelse af miljø og natur. Ved udpegning af disse områder til Særligt Følsomme Landbrugsområder (SFL-områder) kunne der endvidere opnås tilskud til omlægningen og dermed et muligt økonomisk incitament for lodsejeren. Ved langvarig udtagning kan omlægningen kombineres med skovrejsning i områder, hvor dette er muligt og hensigtsmæssigt.

### Skovrejsning

Skovrejsning vil have langvarig effekt pga. træers vækstrytme, som har en 50 - 100 årig horisont. Ved etablering af skov bindes næringsstoffer og således også fosfor i lange perioder i jord og bevoksning.

Landbrugsjord, der overgår til skovrejsning, vil som regel være beriget med store mængder fosfor. Noget af dette fosfor vil lettere mobiliseres, når jorden forsures efter skovrejsning dels på grund af ophørt kalkning dels gennem naturlige processer (Gundersen, 2003). Desuden har flere undersøgelser vist, at adsorberet fosfor kan mobiliseres og udvaskes ved en stigning i indholdet af opløst organisk stof (især indholdet af små organiske carboxylsyrer) (Beauchemin et al., 1996; Xiao et al., 1991; Fox et al., 1990). Jordvand under skove er netop karakteriseret ved højere koncentrationer af opløst organisk stof end under landbrugsjord. Det er endvidere sandsynligt, at der vil være en større andel af fosfor i dette opløste organiske stof, således at fosforudvaskning også på denne måde kan blive forøget i en overgangsperiode. I de første år kan den beskedne plantevækst endvidere medføre, at arealet er åbent for overfladeafstrømning og evt. erosion, og arealet kan måske i denne situation være mere sårbart end mange landbrugsarealer. Når den nye beplantning er i vækst og efter en årrække dækker arealet, vil næringsstofferne igen fastholdes i jord og trævækst. En evt. frigivelse vil først ske ved hugst, og her vil udnyttelsen af træmassen have stor betydning. Nedenstående eksempler er fra rødgranbevoksninger, og værdierne er kg fosfor pr. ha (Gundersen, 2003):

<u>Over 75 år omdrift</u>	<u>bedste jorde</u>	<u>fattige jorde</u>
Maksimal akkumulering	190	50
Akkumulering ved typisk scenario	63	16
Retur til jord ved afdrift	100	30

Maksimal akkumulering sker ved heltræsudnyttelse i alle tyndinger og afdrift. Typisk scenario er alm. praksis i rødgran i dag med flisning af første tyndinger, mens kun stammer fjernes til sidst. Dvs. kronemasse, grene osv. vender tilbage til jorden (sidste tal). I den typiske situation i dagens skovbrug vil en betydelig del af det i træmasse akkumulerede fosfor således vende tilbage til jorden.

I undersøgelser er der fundet koncentrationsniveauer for fosfor i jordvand efter stormfald eller afdrift på 0,02 mg fosfor pr. liter eller mindre (Gundersen, 2003). Et problem ved renafdrift på skrånende arealer kunne være 'erosion' af organisk materiale til vandløb og søer. En kvantificering af effekten af skovrejsning forekommer ikke muligt med den nuværende viden. Mange forhold spiller ind på den samlede virkning, og denne vil variere fra område til område og desuden med driftsforholdene.

En sideeffekt af skovrejsning vil være en reduceret udvaskning af kvælstof, som vil opnås i løbet af få år. Der er desuden naturfordele forbundet med skovrejsning som etablering af vildtrefugier og spredningskorridorer i landskabet og en brydning af et evt. monotont landskab.

### *Bufferzoner langs vandområder (Ripariske bufferzoner)*

Bufferzoner langs vandområder (vandløb, søer, fjorde etc.) opfanger især partikulært bundet, men kan også opfange opløst fosfor og nedsætter derved udledningen til vandmiljøet. Formentlig vil der være en vis dynamik i en bufferzone. I bufferzonen vil der ske en opkoncentrering af fosfor, og dermed teoretisk set opbygges et større potentiale for tab. Dette potentiale kan udløses ved en kraftig nedbørshændelse med en kortvarig øget udledning til følge, ved langsom udsivning eller såfremt der foretages en opdyrkning af bufferzonen. I danske og udenlandske undersøgelser er der fundet god virkning af bufferzoner på 4 - 5 m's bredde. Dog er der også eksempler på negativ virkning, dvs. at der frigives mere fosfor fra zonen, end der opfanges. Ved stor afstrømning og materialetransport på de oven for bufferzonen liggende arealer kan der ske en gennembrydning af zonen, hvor vandet samler sig i en koncentreret strøm ovenfor denne. Dette kan bl.a. ske ved, at vandet løber i store riller på marken og ved vandstrømning parallelt med og i bufferzonens øvre kant.

Antages det, at bufferzoner kan opfange hele det partikelbundne bidrag fra de højereliggende arealer, er den mulige effekt 0,04-0,2 kg fosfor pr. ha pr. år (tabel 3.21). Jo bredere afstrømningszonen ovenfor bufferzonen er, jo større skal bufferzonen være for at tilbageholde alt det eroderede partikelbundne fosfor. Ved meget brede afstrømningszoner (flere hundrede meter) kræves derfor også bredere bufferzoner for at opnå fuld tilbageholdelse af det partikulært bundne fosfor.

Bufferzonen er som regel en god, men i nogle tilfælde måske kun midlertidig foranstaltning, og det kan være nødvendigt at følge op med en drift, som reducerer erosion og overfladeafstrømning på det ovenfor liggende areal. Bufferzonen har dog også en anden virkning, idet der opretholdes en vegetation langs vandområdet, hvorved brinkerrosion givetvis modvirkes. Denne virkning forstærkes især, hvor bufferzonen friholdes for store kreaturer og færdsel med maskiner. Får og geder kan hjælpe ved at fjerne fosfor fra zonen og kan samtidig have en positiv effekt på jorden ved at "træde den sammen", når den er fugtig eller løs (i modsætning til de store kreaturer, som "træder jorden op"). Bufferzoner vil også have betydning for tabet af andre næringsstoffer og kan virke som vildtrefugier og spredningskorridorer i landskabet.

### *Barrierer i landskabet*

Levende hegn, diger mv. vil modvirke vinderosion, opfange eroderet materiale og binde opløst fosfor i overfladisk afstrømmende vand og derved forhindre videre transport til vandområder. Virkningen vil svare til bufferzonens, men har formentlig ofte mindre direkte betydning for overfladeafstrømmet og vanderoderet fosfor som følge af større afstand til vandområder. Desuden kan man sige, at jord og fosfor, der opfanges langt fra vandløbet, ikke udgør en pulje, der potentielt kan frigøres til vandløbet på senere tidspunkter, f.eks. ved brinkscred, gennembrud eller langsom udsivning som opløst fosfor. De nævnte barrierer vil også have betydning for tabet af andre næringsstoffer og kan virke som vildtrefugier og spredningskorridorer i landskabet.

### *Etablering af vådområder og søer*

Ved etablering af vådområder øges vandstanden temporært eller permanent på det pågældende areal. Vandtransporten ud til recipienten forsinkes derved, og det vil give bedre betingelser for aflejring af fosfor i vådområdet, både opløst og partikulært bundet P. Som nævnt i afsnit 3.5.2 kan der



være et betydeligt potentiale for tilbageholdelse af fosfor ved deposition i vådområder, måske 12 – 120 tons fosfor pr. 1.000 ha temporært oversvømmet engareal. Modsat kan den øgede vandstand dog også fremme frigivelsen af fosfor pga. de iltfrie forhold, som opstår. Virkningen af vådområder kan således være modsatrettede. Om fordelene overstiger ulemperne vil afhænge af de aktuelle, lokale forhold, såsom hydrologien, længde af og tidspunkter for oversvømmelsesperioder, fosforkoncentrationer og –former.

Vådområder vil også reducere kvælstofabet ved hjælp af denitrifikation. Samtidig giver de fordele for naturen og landskabet og for vildtet.

Ved etablering af søer vil der med sikkerhed på sigt opfanges fosfor fra det tilstrømmende vand, medens selve etableringsfasen kan virke modsat.

#### *Ekstensivering og midlertidige oversvømmelser af ådale*

Ved ekstensivering af ådale sker der nedsættelse eller ophør af fosfortilførslen og dermed på sigt en reduktion i jordens fosforpulje.

Ved oversvømmelse aflejrer der sediment. Forhold, der har betydning for aflejring af sediment og fosfor i ådale, er:

- oversvømmelsens størrelse, udbredelse og varighed
- koncentration af suspenderet stof og dets indhold af fosfor i vandløb
- vandskiftet mellem vandløb og ådal
- kornstørrelsen af sediment i transport i vandløb
- vegetationen på den oversvømmede ådal
- meso- og mikrotopografiske forhold i ådalen

Undersøgelser viser, at der ved temporære oversvømmelser af ådale kan tilbageholdes relativt store sedimentbundne fosformængder. Selv over længere tidsrum (ca. 40 år) sker der en blivende tilbageholdelse af fosfor i de temporært oversvømmede ådale.

Ved overrislinger af ådale med bagvand fra grøfter mv. er der også i en ådal i Danmark konstateret en tilbageholdelse af sediment og fosfor (Falkum et al., 1997). På grund af de mindre vandmængder, der oversvømmer ådalen, er aflejringen af sediment og fosfor dog meget mindre end ved de egentlige oversvømmelser af ådale. Falkum et al. (1997) fandt en aflejningsrate af sediment på 42-68 kg pr. ha ved to overrislinger af en ådal med grøftvand. Ved den samme undersøgelse blev der målt en fosforaflejring på 1,6-1,9 kg fosfor pr. ha. Undersøgelserne omfatter ikke det opløste fosfor i vandløbsvandet, der oversvømmer ådalen. Antages ådalene at have samme potentiale for fosfortilbageholdelse som vådområder, vil effekten være af samme størrelsesorden som nævnt ovenfor, 12-120 kg fosfor pr. ha. Se i øvrigt under Etablering af vådområder og søer.

Ved ekstensiveret eller ophørt dyrkning vil fosfortilførslen med gødning desuden reduceres eller elimineres, og virkningen heraf vil være som beskrevet under braklægning. Ved inddragelse af åda-

le som virkemiddel vil der formentlig være tale om større, sammenhængende arealer. Også her vil der ske en reduktion i kvælstoftabet. Andre sideeffekter vil være fordele for naturen og vildtet.

### ***Virkemidler baseret på miljøforvaltningstiltag***

#### *Overrisling af enge med drænvand*

Udledning af drænvand på engarealer vil medføre en tilbageholdelse af fosfor på arealerne og dermed reducere udledningen af næringsstoffet, som beskrevet under ådale. I tabel 3.21 er det vurderet, at tab via dræn kan udgøre 0,1-0,5 kg fosfor pr. ha på minerogene risikojorde, 0,02-0,08 kg fosfor pr. ha på lavrisikojorde og 0,4-3 kg fosfor pr. ha på lavbundsjarige. Antages det, at hele den udvaskede mængde fosfor kan tilbageholdes på enge, der overrisles med drænvand, vil effekten af dette virkemiddel være af samme størrelsesorden. Se i øvrigt under Etablering af vådområder og søer.

#### *Afskæring af drænen og grøfter*

Der vil være tale om samme virkning som beskrevet under vådområder. En sideeffekt vil som regel være forringet afdræning af de ovenfor liggende arealer og dermed vanskeligere markdrift. I særlige tilfælde kan dyrkning måske umuliggøres.

#### *Sedimentationsdamme for drænvand*

Virksomheden er sammenlignelig med overrisling af enge, og det må formodes, at effekten er af samme størrelsesorden. Dog kan aflejret fosfor returneres til markerne ved, at sedimentet fjernes fra dammene. Ved store sedimentmængder kræver det dog håndtering af store mængder materiale.

I Finland ydes der miljøltilskud til etablering af sedimentationsdamme og vådområder for rensning af afstrømning fra landbrugsarealer (Valpasvuo-Jaatinen, 2003). I en konstrueret dam sedimenteres opslemmet materiale, hvorefter vandet ledes ud over et mindre vådområde for yderligere rensning. Både sedimentationsdam og vådområde skal hver især som minimum udgøre 0,1-0,2% af afstrømningsområdet. Landmænd, der indgår i ordningen, tegner en kontrakt for 5-10 år med den finske stat.

Endvidere pågår der forsøg ved Finlands landbrugsforskningsinstitution MTT Agrifood Research Finland med etablering af sedimentations- og udfældningsdamme for afløb fra dyrkede arealer (Aura, 2003). Princippet er en todelt proces, hvor der i første bassin sker sedimentation af opslemmet materiale, og ved overløbet til udfældningsbassinet tilsættes et udfældningskemikalie f.eks. aluminiumhydroxy polymer. Efter rensning udledes vandet fra udfældningsbassinet til vandløb. Systemet anvendes også til rensning af husholdningsspildevand.

#### *Beskyttelse af brinker mod erosion*

Ved en formindskelse af brinkerrosionen vil en væsentlig kilde til tab af fosfor påvirkes, og tabet reduceres (se afsnit 3.4.6). Et af virkemidlerne er skånsom vandløbsvedligeholdelse. En afledt effekt vil være reduceret sedimentation i vandløbssystemet, idet der kommer mindre materiale ud i vandløbet. Omvendt kan der ved grødeslagning og anvendelse af sedimentationsdamme indskudt i vandløbssystemet og fjernelse af materialet fjernes fosfor fra vandløbet. Grødeslagning, hvor grøden føres med strømmen, vil derimod formentlig fremme fosfortransporten ud i de åbne vande. Skånsom

vandløbsvedligeholdelse anvendes dog allerede i udstrakt grad, hvorfor en yderligere virkning af denne foranstaltning vil være begrænset. Medfører den skånsomme vedligeholdelse mindre grødeslagning, kan en anden effekt være nedsat vandføringsevne i vandløbet og dermed forringet vandafledning fra markerne. Dette vil hæmme markarbejdet især i det tidlige forår og kan øge problemerne med vandsamlinger i lavninger på drænedes arealer.

Andre virkemidler er at undgå at beskadige brinker ved færdsel, dyrkning og nedtrampning forårsaget af dyr. Virkningen af nedsat brinkerosion kan være betydelig, idet der ved nogle undersøgelser er fundet, at denne erosionsform kan bidrage med 15 - 40% af den samlede fosfortransport i vandløb (se afsnit 3.4.6).

#### *'Høste' bræmmer og brinker*

I forbindelse med en dansk undersøgelse om brinkerosion viste det sig, at brinker og bræmmerne havde et ret højt indhold af fosfor (afsnit 3.4.6). En – omend mere teoretisk end praktisk gennemførlig – mulighed er at fjerne næringsstoffer fra bræmmer og brinker, f.eks. ved at 'høste' vegetationen i bræmme og på brink over en længere årrække. Der foreligger ikke nogen praktiske erfaringer med en sådan form for 'høslæt' af bræmmer og brinker. Det vil være væsentligt at få fjernet plantematerialet helt, eller eventuelt lægge det ind på marken, langt væk fra vandløbet. Det er endvidere afgørende, at brinken ikke forstyrres eller destabiliseres – f.eks. ved at tunge maskiner færdes i bræmmen tæt på brinkkanten. Som ved grødeskæring bør der spændes net på tværs af vandløbet så løs, flydende grøde bliver opsamlet og fjernet. Der foreligger danske praktiske erfaringer i forbindelse med grødeskæring, som eventuelt kan være en inspiration. Der foreligger desuden amerikanske erfaringer med at fjerne næringsstoffer fra brede skovbevoksede bræmmer, men disse erfaringer kan ikke overføres på danske forhold.

Plantesamfundet vil blive påvirket af en sådan form for 'høslæt', som evt. kan forbeholdes bræmmer og brinker med ensartet bevoksning af græs og urter. Bræmmer og brinker med særegne planter og plantesamfund bør ikke udsættes for 'høslæt'. Der kan evt. skeles til erfaringer fra beskæring af grøftekanter med hensyn til, hvordan planter og plantesamfund påvirkes af gentagen beskæring. Der findes på nuværende tidspunkt ingen erfaringer mht. virkemidlets gennemførlighed og effekter.

I Finland etableres smalle (1-3 m) udyrkede beskyttelseszoner langs vandløb. Derudover gives tilskud til frivillig udlægning af minimum 15 m brede bufferzoner i det ovenfor liggende område på stejle skråninger og i retentionsområder, som vandløbet periodisk oversvømmer (Hagelberg, 2003). Både i beskyttelseszonen og i bufferzonen skal vegetationen slås og fjernes en gang årligt, hvorved der fjernes næringsstoffer, herunder også fosfor, fra arealerne. I bufferzonen må der endvidere afgræsses, såfremt det ikke er miljømæssigt skadeligt for vandløbet. Samtidig kan de brede beskyttelseszoner danne større, sammenhængende områder til gavn for både miljø og natur.

### 3.10.3 Oversigt over virkemidler og deres skønnede effekt

#### Generelle virkemidler

Virke- middel	Virkemåde	Foranstalt- ningstype	Tidshorisont for virkning <sup>1)</sup> (kort/ mellemlang/ lang sigt) <sup>2)</sup>	Hvor sikkert er det, at virkemidlet har effekt <sup>3)</sup> (ukendt, usikker, sikker)	Skønnet effekt af virkemidlet, kg P pr. ha	Virkemidler klassificeret efter forventet effekt på fosfortab pr. ha  <b>1 størst effekt</b>	Andre positive/negative effekter og begrænsninger
Behovs- betinget fosfor- tilførsel	Reducerer nettotilførsel af P til jor- den, og for- bedrer for- delingen af det tilførte P	Driftsmæs- sige foran- staltninger	Lang	Sikker		1	Kræver præcise metoder for fastsættelse af behov på alle jordtyper. Kræver ofte øget udspretnings- areal for husdyrgødning- en
Normalt for fosfor- tilførsel til afgrøder			Lang	Sikker		2	Normalt for fosfor skal defineres og udvikles
Reduceret fosforind- hold i husdyr- gødningen			Lang	Sikker		2 (forudsat maksimalt mulig reduktion)	Medfører mere optimal fosforudnyttelse i landbruget
Gøds- ningstek- nologi			Lang	Usikker		4-5	Evt. behov for udvikling af ny teknologi. Evt. øget energi behov
Gyllese- paration			Lang	Usikker		4	Evt. behov for udvikling af ny sprednings- teknologi. Nedsat trans- portbehov, men evt. ud- kørsel flere gange på samme areal
Øgede harmoni- krav		Produktions- regulering	Lang	Sikker		3 (forudsat bedre fordeling af husdyr- gødningen)	Bevirker øget efterspørgsel efter jord

1) For hvornår effekten slår igennem i tabsmålinger.

2) Kort: 1-2 år. Mellemlang: ca. 10 år. Lang: 30-50 år.

3) I forhold til nutidstilstanden.

## Virkemidler i risikoområder baseret på driftsmæssige reguleringer

Virke-middel	Virkemåde	Tidshori-son for virkning <sup>1)</sup> (kort/mellem-lang/lang sigt) <sup>2)</sup>	Hvor sikkert er det, at virkemidlet har effekt <sup>3)</sup> (ukendt, usikker, sikker)	Skønnet effekt af virkemidlet, kg P pr. ha	Virkemidler klassificeret efter forventet effekt på fosfortab pr. ha. <b>1 størst effekt</b>	Andre positive/negative effekter og begrænsninger
Reduceret jordbe- arbejdning	Kan mod- virke ero- sionsbetin- get tab	Kort	Usikker		4-5	Kan både hæmme og fremme fosfortab. Kan øge pesticidbehovet
Jordbear- bejdning på tværs af skråninger		Kort	Usikker /sikker af- hængig af jordbearbejdning- gen, afgrøden og jordtype/topografi		3	Vanskeligt på stærkt skrånende arealer
Undlade kørespor i afgrøder, der sås på langs ad skråninger		Kort	Usikker/ukendt		4	
Direkte såning af vintersæd	Mindsker erosion og overfladeaf- strømning	Kort	Sikker		3	Forudsætter direkte såning i stubmark
Udelukke vintersæd på erosions- truede area- ler		Kort	Sikker	0,06-0,25	2	Krav om andre afgrøder som "grønne marker"
Etablere vedvarende græs		Kort	Sikker	0,06-0,25	1	Vanskelig at anvende på svine- og planteavlbrug
Undgå gød- ningsud- bringning på skrå- nende arealer forud for kraftig nedbør	Kan mindske overflade- afstrømning og evt. ned- sivning	Kort	Usikker/sikker afhængig af den konkrete klima- situation		3	Kan fremme risikoen for ammoniakfordampning ved udbringning af husdyrgødning
Dyrkning af flerårige non-food afgrøder	Kan mind- ske erosion og overflade- afstrømning.	Mellem- lang/lang	Usikker/sikker		4	Specialafgrøder med et begrænset potentiale for dyrkning
Dyrkning af afgrøder med stort fosforbehov	Reducerer nettotilfø- rel af P til jorden	Lang	Sikker		4	Udnyttelse af planterne som råmateriale for aminosyreproduktion
Tilførsel af fosfor- bindere til jord (Fe- og Al-oxider)	Øger fast- læggelsen af P i jord	Kort/mel- lemlang	Ukendt		4	Kun anvendelig i begrænset omfang

1) For hvornår effekten slår igennem i tabsmålinger.

2) Kort: 1-2 år. Mellemlang: ca.10 år. Lang: 30-50 år.

3) I forhold til nutidstilstanden.

### Virkemidler i risikoområder baseret på arealændringer

Virke-middel	Virkemåde	Tidshorisont for virkning <sup>1)</sup> (kort/mellemlang/lang sigt) <sup>2)</sup>	Hvor sikkert er det, at virkemidlet har effekt <sup>3)</sup> (ukendt, usikker, sikker)	Skønnet effekt af virkemidlet, kg P pr. ha	Virkemidler klassificeret efter forventet effekt på fosfortab pr. ha. I størst effekt	Andre positive/negative effekter og begrænsninger
Braklægning	Fjerner fosfortilførsel til jorden. Kan mindske jorderosion og overfladeafstrømning	Kort	Sikker overfor erosion. Ukendt overfor nedsvivning	0,06-0,25 på erosionstruede arealer	1	Ingen fraførsel af P fra jorden. Mindsker N-tab. Skaber vildtrefugier
Skovrejsning	mindske jorderosion og overfladeafstrømning	Mellemlang/lang	Usikker		3	Kan på kortere sigt øge erosion og nedsvivning. Nedsætter til- og fraførsel af P fra jorden. Mindsker N-tab. Skaber spredningskorridorer, vildtrefugier og bryder landskabet
Ripariske bufferzoner	Opfanger partikulært og til dels opløst P	Kort	Sikker for partikulært P	0,04-0,2 se tekst	1	Mindsker N-tab. Skaber spredningskorridorer, vildtrefugier og bryder landskabet
Barrierer i landskabet (levende hegn etc.)	Mindsker jorderosion og overfladeafstrømning samt vinderosion	Kort/mellemlang	Sikker over for vinderosion. Usikker overfor øvrige tab		4	Skaber spredningskorridorer, vildtrefugier og bryder landskabet
Etablere vådområder og søer	Sedimentation af partikulært P. Evt. reduktion i fosfortilførsel	Kort	Sikker mht. sedimentation. Usikker overfor nedsvivning	12-120	2	Mindsker N-tab. Skaber naturfordele og vildtfordele
Ekstensivering og midlertidige oversvømmelser af ådale	fosfortilførsel	Kort	Sikker mht. sedimentation. Usikker overfor nedsvivning	12-120	2	Mindsker N-tab. Skaber naturfordele og vildtfordele

1) For hvornår effekten slår igennem i tabsmålinger.

2) Kort: 1-2 år. Mellemlang: ca.10 år. Lang: 30-50 år.

3) I forhold til nutidstilstanden.

### Virkemidler i risikoområder baseret på miljøforvaltningstiltag

Virke-middel	Virkemåde	Tidshorisont for virkning <sup>1)</sup> (kort/mellemlang/lang sigt) <sup>2)</sup>	Hvor sikkert er det, at virkemidlet har effekt <sup>3)</sup> (ukendt, usikker, sikker)	Skønnet effekt af virkemidlet, kg P pr. ha	Virkemidler klassificeret efter forventet effekt på fosfortab pr. ha. 1 størst effekt	Andre positive/negative effekter og begrænsninger
Overrisling af enge med drænvand	Sedimentation af partikulært P	Kort	Sikker mht. sedimentation. Usikker overfor nedsivning	0,02-0,08 0,1-0,5 0,4-3 (se tekstafsnittet)	2	Mindsker N-tab. Medfører evt. naturfordele og vildtfordele
Afskæring af dræn og grøfter		Kort	Usikker/sikker		3	Kan medføre dannelsen af lokale vådområder. Forringet afdræning på ovenfor liggende arealer
Sedimentationsdamme for drænvand		Kort/mellemlang	Sikker mht. sedimentation. Usikker overfor nedsivning	0,02-0,08 0,1-0,5 0,4-3 (se tekstafsnittet)	2	Evt. håndtering af store mængder materiale
Beskyttelse af brinker mod erosion	Mindsker brinkerrosion	Kort	Sikker		1	Evt. reduceret vandtransport i vandløb pga. nedsat grødeslagning
'Høste' brinker og bræmmer	Fjerner fosfor og andre næringsstoffer fra brink og bræmme	Mellemlang/lang	Usikker/ukendt		3	Ingen danske erfaringer mht. virkemidlets gennemførlighed og effekter. Muligvis naturmæssige negative effekter

1) For hvornår effekten slår igennem i tabsmålinger.

2) Kort: 1-2 år. Mellemlang: ca.10 år. Lang: 30-50 år.

3) I forhold til nutidstilstanden.

Ved implementering af virkemidlerne vil et samarbejde omkring opgaven være essentielt for effekten af og omkostningerne ved anvendelsen af det enkelte virkemiddel. Dermed er en reduktion af fosfortabet en opgave, som mest hensigtsmæssigt løftes i fællesskab af landbrugserhvervet, de areal- og miljøforvaltende myndigheder og rådgivningstjenesten og med støtte i og samarbejde til forskningssektoren og dens resultater. Fælles fokus for en indsats kunne udmærket være udvikling og implementering af det omtalte fosforindekskoncept, hvorved de mangeartede elementer i fosfortabsproblematikken kunne tilpasses individuelt på bedriftsniveau. Herved forventes, at de forskellige interesser i forbindelse med fosfortabet kan ansues og afvejes i en helhed, og at der dermed kan opnås en koordineret indsats og et optimeret resultat.

Dialog med og vejledning og information til landmændene bør derfor tages i anvendelse som vigtige redskaber. Der er ikke tvivl om, at øget bevidsthed om virkemidler til begrænsning af fosfortab fra landbruget og om disses anvendelse og tilpasning på den enkelt bedrift vil have en positiv indflydelse på bestræbelserne for at reducere tabet. Ovenfor er anført en række virkemidler, som kan anvendes mod fosfortabet i individuelt tilpassede kombinationer på den enkelte bedrift. Formentlig kan der herudover, i samarbejde med driftslederen, identificeres nye og hidtil ikke erkendte virkemidler, som kan medføre en optimeret effekt på fosfortabet i kombination med størst mulig hensyntagen til landbrugsdriften. Det gælder både for generelle virkemidler og ikke mindst for virkemidler i risikoområder.





## 4. KONKLUSIONER

Fosfor er et livsnødvendigt næringsstof for både planter og dyr, og fosfor findes således naturligt i jord, vand, dyr og planter. For at sikre sundhed og tilstrækkelig produktion tilføres fosfor derfor i både husdyr- og planteproduktionen. Som resultat heraf er mængden af fosfor i dansk landbrugsjord i gennemsnit øget med 1,4 tons fosfor pr. ha i løbet af det seneste århundrede. Frem til engang i 70'erne opbyggedes fosforpuljen i jorden med henblik på at sikre tilstrækkelig forsyning af fosfor til afgrøderne. I 70'erne og 80'erne var fosforophobningen særlig stor, da man i mange tilfælde fortsatte med at supplere med handelsgødningsfosfor på trods af, at jordens fosforstatus var tilstrækkelig. Fosforophobningen er meget forskellig fra egn til egn i Danmark. I dag finder ophobningen især sted i husdyrintensive områder. Også inden for den enkelte bedrift findes der en ujævn fordeling, idet man historisk set har jorde, der bærer en langt større del af fosforophobningen end andre. Fordelingen af den del af fosfortilførslerne, der kommer fra husdyrgødningen, kan med rimelig sikkerhed kortlægges på kommune- eller sogneniveau for det seneste århundrede. Kortlægning af den historiske fosforophobning ned på markniveau kræver derimod egentlige målinger af jordens fosforstatus.

Størstedelen af det fosfor, der tilføres jorden, indgår i jordens pulje, hvorfra det igen langsomt kan frigives til jordvæsken. Hele jordprofilen, og ikke kun pløjelaget, har betydning for en jords evne til at binde og frigive fosfor. Jordens fosforpulje og omsætningen i denne har derfor stor indflydelse på hvor meget fosfor, der kan tabes fra en jord. Jo mere fosfor, der ophobes i jorden, jo mere vil der kunne tabes. Jordens fosforpuljer har derfor også større betydning for det årlige dyrkningsbetingede tab end de årlige tilførsler med gødningen, såfremt gødningen håndteres hensigtsmæssigt. Det er ikke muligt ud fra den foreliggende viden at kvantificere sammenhængene mellem tilførsel og ophobning af fosfor med tabet af fosfor.

Risiko for betydende fosfortab til vandmiljøet opstår, når en transportvej forbinder et område med højt indhold af transporterbart fosfor med vandmiljøet. Flere forskellige transportveje (vand-, vind- og brinkerosion, overfladeafstrømning, afstrømning via kunstige dræn og øvre grundvand) kan være aktive, og forskellige marker og dele af marker kan levere bidrag af endog meget forskellig størrelse til det samlede diffuse tab af fosfor fra landbrugsarealer til vandmiljøet. Et højt fosforindhold i dyrkningslaget er derfor ikke nødvendigvis en risiko i sig selv, og fosforstatus i pløjelaget kan derfor ikke isoleret anvendes ved vurdering af tabspotentialet.

Viden om størrelsen af det dyrkningsbetingede fosfortab fra landbrugsarealer til vandmiljøet (dyrkningsbidraget) i Danmark stammer altovervejende fra det landsdækkende overvågningsprogram NOVA, hvor det årlige bidrag er estimeret siden 1989 ud fra målinger af fosforkoncentrationer og afstrømning i vandløb. Det i NOVA målte fosfor stammer fra det naturlige baggrundsbidrag, punktkilder, bidrag fra spredt bebyggelse og dyrkningsbidraget. Der har ikke kunnet påvises signifikante ændringer i det absolutte tab af fosfor fra diffuse kilder (dyrkningsbidrag, spredt bebyggelse og baggrundsbidrag) ved målinger af fosfor i vandløb under NOVA siden 1989. Målingerne viser derimod, at bidraget fra diffuse kilder til vandmiljøet varierer meget fra år til år på grund af varierende

vejrforhold. Dyrkningsbidragets størrelse er væsentligt større i våde år end i tørre år, og der er en klar sammenhæng mellem afstrømningen og dyrkningsbidragets størrelse. Denne sammenhæng er væsentlig at notere sig, da man forventer, at klimaændringerne vil kunne føre til øget nedbør i Danmark.

Ud fra NOVA er det kun muligt at estimere det samlede dyrkningsbidrag. Der findes få og enkeltstående undersøgelser af fosfortabet fra de forskellige transportveje, som anses for væsentlige for fosfortab fra det dyrkede areal under danske forhold. Til trods for at disse undersøgelser ikke er designet med opskalering til nationalt niveau for øje, er det samlede dyrkningsbidrag med udgangspunkt i disse undersøgelser (440-1180 tons fosfor årligt) i god overensstemmelse med dyrkningsbidraget bestemt ud fra NOVA (690-1300 tons fosfor årligt). Tabsstørrelsen for de individuelle tabsveje er dog yderst usikkert fastsat pga. det spinkle og kun delvist egnede datagrundlag. Det er væsentligt at huske på, at både størrelsesordener og den relative betydning af de forskellige tabsveje varierer betydeligt fra opland til opland.

Der eksisterer p.t. ikke tilstrækkelig viden og anvendelige dynamiske modeller for fosforomsætningen og tabsprocesserne, og dermed er der ikke mulighed for modelbaserede konsekvensberegninger af tiltag til reduktion af fosfortabet. Som følge heraf er forskellige virkemidlers potentiale og tidshorisont for reduktion af fosfortabet fra det dyrkede areal særdeles vanskelige eller umulige at kvantificere.

Generelle virkemidler omfatter tiltag, som kan mindske tilførslen af fosfor med handels- og husdyrgødning til det dyrkede areal. Det sidste kan ske gennem fodringsbetingede ændringer, der sikrer, at fosforudnyttelsen øges, og fosforudskillelsen mindskes hos det enkelte husdyr. Der kan peges på en række forskellige virkemidler vedrørende husdyrenes fodring og fosforudnyttelse. Disse virkemidler har generelt kort eller mellemlang tidshorisont. Et virkemiddel med stort potentiale er at mindske forbruget af foderfosfat.

Den væsentligste reduktion i foderfosfattilskuddet er knyttet til brugen af fytase (naturligt forekommende og tilsat mikrobiel fytase). Fosforudskillelsen kan hos svin og fjerkræ reduceres ved at øge tilgængeligheden af foderets naturlige fosforindhold gennem sikring af passende fytaseaktivitet i foderet kombineret med reduceret brug af foderfosfattilskud. Hos drøvtyggere kendes potentialet for eventuel anvendelse af fytasetilsætning endnu ikke. Hos pelsdyr er der ikke aktuelt et potentiale for at anvende fytase, idet der ikke anvendes tilskud af foderfosfater.

Reduktionen i fosfattilskuddet er ud over anvendelsen af fytase også knyttet til udarbejdelsen og anvendelsen af forbedrede fodringsanbefalinger for fosfor i praksis, hvilket er et mål for alle husdyrarter. Det kræver for alle arter et forbedret kendskab til det fysiologiske fosforbehov. Hos kvæg vurderes, at det på sigt bliver muligt at reducere fodringsnormen væsentligt, hvorimod potentialet hos svin er mere begrænset, da der allerede er gennemført væsentlige reduktioner i fodringsnormerne. Det er vanskeligt at vurdere, hvor meget der kan spares hos fjerkræ pga. ringe kendskab til fosforomsætning og -behov under danske forhold, men det vurderes, at fodringsnormerne vil kunne re-

duceres. Hos pelsdyr skyldes den store fosforudskillelse, at råvarerne har et højt naturligt fosforindhold, som langt overstiger dyrenes behov.

Sammenlagt vurderes det, at det årlige forbrug af foderfosfat på sigt (5-10 år) vil kunne nedsættes med 8.000, 3.000 og 800 tons for svin, kvæg og fjerkræ. Det betyder, at foderfosfatforbruget vil kunne reduceres fra 17.800 til 6.000 tons. Herved reduceres den samlede fosforudskillelse med husdyrgødningen fra omkring 52.000 tons (i 2002) til omkring 40.000 tons (ved uændret produktion). Forbedringer i fodereffektivitet og produktivitet vil formentlig også kunne medføre et lille fald i fosforudskillelsen.

Blandt virkemidlerne med længere tidshorison kan peges på bioteknologisk eller konventionelt forædlede afgrøder, der har en højere fytaseaktivitet (varmestabil) og/eller et lavere indhold af fyttatbundet fosfor. Desuden kan der måske udvikles mere effektive varmestabile fytaser til tilsætning.

De fodringsbetingede virkemidler, som hovedsagelig har generel karakter, kan være med til at sikre, at fosforpuljen i jorden ikke øges, specielt i husdyrintensive områder. De fodringsmæssige virkemidler vurderes at kunne bidrage væsentligt til, at der skabes overensstemmelse mellem tilførsel og fraførsel af fosfor fra dyrkede arealer efter de nugældende harmoniregler. Det skønnes, at dette kan opnås hos de fleste husdyrarter og -kategorier, men hos bl.a. fjerkræ (især æglæggende høner) må forskningen afklare, hvorvidt det reelt er muligt. Hvis fosforudskillelsen hos pelsdyr skal reduceres, vil det formentlig kræve, at fosfatrige råvarer fravælges, eller at de traditionelle råvarers fosforindhold reduceres. Speciel håndtering af gødningen fra pelsdyr kan også være et alternativ.

Den skønnede reduktion i forbruget af foderfosfat vurderes at medføre, at den gennemsnitlige årlige tilførsel af fosfor med husdyrgødning falder fra 22 kg pr. ha (i 2000/2001) til omkring 17 kg pr. ha. Dette betyder, at det beregnede gennemsnitlige årlige fosforoverskud reduceres fra 13,4 til 8,4 kg pr. ha, idet det antages, at reduktionen i foderfosfatforbruget ikke modsvares af en stigning i handelsgødningsfosfat. Det gennemsnitlige bidrag fra handelsgødning og slam er beregnet til at udgøre omkring 9 kg pr. ha (i 2000/2001). Under forudsætning af, at foderfosfatforbruget sænkes, at husdyrproduktionen er uændret, og at brugen af handelsgødningsfosfat og slam udelades, vil det årlige fosforoverskud i dansk landbrug således kunne elimineres på landsplan.

Generelle foranstaltninger med sigte på at nedsætte fosfortilførslen til landbrugsjorden vil først på længere sigt vise effekt i vandmiljøet. Skal fosfortabet fra landbrugsarealet reduceres på kortere sigt, må der sættes ind med målrettede foranstaltninger mod tabet fra risikoområder. En forudsætning herfor er, at disse risikoområder kan udpeges med tilstrækkelig sikkerhed. Erosionstruede områder er kortlagt i et projekt, men denne kortlægning kan ikke stå alene, da den ikke omfatter alle relevante tabsveje for fosfor. Den nødvendige viden om alle betydende tabsprocesser bør fremskaffes, således at risikoområder for tab via alle tabsveje, også tab via udvaskning, kan udpeges, og et redskab hertil bør udvikles og tilpasses danske forhold. I denne rapport skitseres forskellige muligheder for kortlægning af andre risikofaktorer og forskellige tilgange til, hvordan disse kan integreres i et fremtidigt værktøj til udpegning af risikoområder og transportveje. En identifikation af risikoområder på en passende skala, f.eks. ned til mark eller delmarkniveau vil sikre størst mulig effekt i vand-

miljøet. Indsats og virkemidler i risikoområder må nødvendigvis tilpasses lokalt alt efter hvilke transportveje og delområder, der dominerer, og hvilken reduktion i tabet, der er påkrævet i det givne indsatsområde. Eksempelvis kan der tages udgangspunkt i de krav, der skal opfyldes i forbindelse med regionplaner og Vandrammedirektivet. Indsatsen vil ofte skulle rettes mod den transportvej, der flytter fosfor fra marken eller brink til vandmiljøet, men kan også gå ud på at sænke fosforindholdet i risikoområdet eller fiksere fosforet på en ikke transporterbar form.

De omtalte virkemidler i stalden og på marken sigter mod: 1) at begrænse yderligere opbygning eller reducere jordens fosforpulje og 2) at begrænse fosfortabet i risikoområder. De generelle virkemidler vurderes dels at kunne sikre en reduktion i det årlige fosforoverskud og på sigt at kunne eliminere overskuddet, dels at sikre en bedre fordeling af fosfor over det dyrkede areal. Overordnet vil det medføre en forbedret fosforudnyttelse i landbrugssektoren. De generelle virkemidler vil også, hvis de sættes ind med tilstrækkelig styrke bidrage til at sikre, at der ikke opbygges nye arealer med risiko for store fosfortab til overfladevand.

*Den ideelle strategi på fosforområdet opnås derfor ved anvendelse af generelle virkemidler til begrænsning af fosforophobningen og forbedret fordeling af fosfor på hele landbrugsarealet kombineret med en særlig indsats mod fosfortabet fra specifikke risikoarealer.*

Tidshorizonten for sikker, målbar effekt på fosfortabet til vandmiljøet vil afhænge af, hvilke virkemidler, der vælges, og med hvilken styrke, de iværksættes. I den sammenhæng er det vigtigt at være opmærksom på, at ændringer i klima mv. i sig selv kan have stor betydning for fosfortabet og kan dermed sløre effekterne af de iværksatte virkemidler.

## 5. VIDENSBEHOV

Udarbejdelsen af denne rapport har afdækket behov for ny viden, som på kortere eller længere sigt vil kunne bidrage til en forbedret fosforudnyttelse i landbruget og/eller til reduktion i fosfortabet fra landbrugsarealer til vandmiljøet. Vidensbehovet har nær sammenhæng med den i rapporten opstillede strategi på fosforområdet, som dels sigter på at begrænse fosforophobningen på landbrugsarealet, dels sigter på at reducere fosfortabet med særlig fokus på risikoarealer. Behovene kan naturligt opdeles på fem hovedområder:

1. Reduceret fosfortilførsel til landbruget og bedre fordeling på landbrugsarealerne
2. Undersøgelse og kvantificering af fosfortab fra forskellige kilder
3. Den miljømæssige effekt af fosfor i vandmiljøet
4. Foranstaltninger mod tabet af fosfor fra landbruget
5. Økonomiske konsekvenser af en indsats til forbedring af fosforhusholdningen.

### 5.1 Reduceret fosfortilførsel til landbruget og bedre fordeling på landbrugsarealerne

En reduktion i fosfortilførslen og bedre fordeling kræver indsats på flere områder. Dels er der behov for større viden om muligheder og begrænsninger for husdyrenes udnyttelse af det basale fosforindhold i foderstofferne, dels rejser kravet om en bedre fosforfordeling en række spørgsmål, som må afklares.

#### *Fastlæggelse af husdyrenes fosforbehov*

For at reducere fosforudskillelsen fra husdyrene mest muligt, er det nødvendigt at have et sikkert kendskab til husdyrenes fysiologiske fosforbehov. I de seneste år er der gennem forskning og forsøg etableret et forbedret kendskab til især svins fosforbehov, men der mangler stadig viden vedr. fosforbehovet hos kvæg, fjerkræ og mink, ligesom behovet hos især søer kun er sparsomt belyst. Der mangler også generel viden omkring behovet for fosfor til husdyrenes knogleopbygning og -mineralisering og til betydningen af samspillet mellem calcium og fosfor ved knoglemineraliseringsprocesserne og i forbindelse med skaldannelsen hos æglæggende høner. Kendskab til husdyrenes fysiologiske fosforbehov er vigtigt, så det bliver muligt at dosere fosfor mere præcist, så dyrenes behov sikres samtidig med, at overdosering undgås. Målet er at øge husdyrenes udnyttelse af fosfor uden, at det giver anledning til velfærds- og sundhedsmæssige problemer og nedsat produktivitet.

#### *Bedre udnyttelse af det naturligt forekommende fosfor i foderstoffer og foderfosfater*

Fosforindholdet i husdyrgødning vil kunne reduceres væsentligt gennem bl.a. forbedring af fordøjeligheden af foderets naturlige indhold af fosfor. Øget kendskab til tilgængeligheden af fosfor i foderstoffer og -rationer vil medføre, at behovet for tilskud af foderfosfat kan minimeres. Endvidere vil øget kendskab til tilgængeligheden af fosfor i foderfosfater betyde, at det bliver muligt at bruge de bedste foderfosfater, når tilskud er påkrævet. Foderets indhold af calcium har betydning for fosfors omsætning og udnyttelse. Samtidig har calciumkilden, hvor kridt er den mest anvendte supple-

ringskilde, indflydelse på pH i urin og gødning. Dette påvirker potentialet for ammoniaktab, hvorfor calcium også i den forbindelse er en vigtig ernæringsmæssig miljøfaktor.

Forskningsbehovene omfatter således især undersøgelser over fordøjeligheden af fosfor i foderfosfat og fodermidler, samt enzymet fytases og calciums indflydelse herpå. Desuden er undersøgelser over udfodringsteknikkens bl.a. vådfodringens betydning for fosfors udnyttelsesgrad væsentlige, idet der også her ligger muligheder for at forbedre anvendelse af fosfor i fodermidlerne.

#### *Bedre fordeling af husdyrgødningen, herunder separering af gylle*

En måde at opnå en bedre fordeling på og undgå unødvendig ophobning af fosfor i egne med stor husdyrproduktion vil være at udbringe husdyrgødningsfosforet i egne af landet, hvor der er mindre husdyrproduktion. Transport af gylle over store afstande er dog dyr og uhensigtsmæssig, men en lille fosforrig, fast fraktion – fiberfraktionen –, som det er lettere og billigere at transportere, kan separeres fra gyllen. Det er endvidere muligt at afbrænde denne fiberfraktion, hvorved transportbehovet yderligere mindskes. Separering af gylle, evt. afbrænding af fiberfraktionen og fordelingen af gødningen rejser imidlertid en række uafklarede spørgsmål, som kræver en forskningsindsats på området.

Den detaljerede geografiske fordeling af gødningsproduktion og -behov er således mangelfuldt kendt. Vor viden om gødningsvirkning og miljøeffekter af separationsprodukter og fiberaske er ligeledes begrænset. Desuden kræves der yderligere udvikling af metoder til separering af gylle og formulering og udbringning af gylleseparatorer og evt. fiberaske. Også området omkring separerings-effektivitet i forhold til dyrenes fodring og ændringer i denne er utilstrækkeligt belyst.

#### *Monitering af husdyrenes fosforforbrug og -udskillelse (sikring af datagrundlaget for opdatering af husdyrgødningens indhold af fosfor, kvælstof, kalium mv.)*

Gennem flere år er udviklingen i udskillelsen af kvælstof, fosfor og kalium fra husdyrene blevet fulgt gennem opdatering af normtal for husdyrgødningens indhold af kvælstof, fosfor og kalium. For at få en sikker vurdering er det nødvendigt, at datagrundlaget videreudvikles og sikres for derved at blive mere solidt og repræsentativt for gældende praksis. Der kræves således opdatering af datagrundlaget vedr. husdyrs foderforbrug, produktivitet, repræsentativitet mv. og en validering af data og vurdering af usikkerheder heri.

## **5.2 Undersøgelse og kvantificering af fosfortab fra forskellige kilder**

De enkelte kilders og transportvejes bidrag til tabet af fosfor er kun mangelfuldt kendt. På landskabsniveau er der et betydeligt behov for bedre og mere kvantitativ viden om betydende transportveje og kildeområder, herunder bedre forståelse af samspillet mellem transportvejene.

#### *Muligheder for yderligere reduktion af fosforudledninger til vandområder fra ikke landbrugsmæssige kilder*

Selv om der allerede er sket en væsentlig reduktion i udledningen af fosfor med spildevand ved indførelse af kravet om fældning af fosfor i spildevandet fra kommunale rensningsanlæg og fra industrien, bør det tages op til vurdering, om der kan foretages yderligere forbedringer. Dette omfatter

bl.a. evaluering af muligheder for at mindske fosforindholdet i urensset spildevand (eksempelvis fosfatfrie vaske- og rengøringsmidler) samt for forbedringer af fosforfjernelsen på rensningsanlæg, regnvandsbetingede udledninger og fra spredt bebyggelse.

#### *Det naturlige fosforbidrag til overfladevand (baggrundsbidraget)*

I forbindelse med EU's Vandrammedirektiv og kortlægning af kilder til fosfor er der et stort behov for at kunne fastlægge det naturlige fosforbidrag til overfladevand fra forskellige landskabstyper/georegioner i Danmark.

#### *Monitering af dyrkningsbidragets fremtidige udvikling*

Dyrkningsbidraget, som det fastsættes via NOVA i dag, er forholdsvist usikkert bestemt. Det bør overvejes at supplere, udvide eller tilpasse monitoringsindsatsen, således at fremtidige ændringer i netop dette bidrag vil kunne fastsættes med større sikkerhed, end det er muligt i dag.

Det er vigtigt at overveje, hvordan tiltag i Vandmiljøplan III skal evalueres for deres effekt på fosforområdet. Skal effekten vurderes alene ud fra dyrkningsbidraget, som det bestemmes i dag, eller er der andre og bedre muligheder? Sikkerheden i vurderingen afhænger af effektiviteten og nøjagtigheden i de anvendte metoder, og der er behov for et udredningsarbejde, der afklarer mulighederne for monitering og evaluering af effekten af miljømæssige tiltag på fosforområdet.

### **5.3 Den miljømæssige effekt af fosfor i vandmiljøet**

Miljøeffekterne af forskellige fosforformer i vandige økosystemer er mangelfuldt kendte. Et væsentligt forskningsfelt er her undersøgelser af biotilgængeligheden af partikulære og organiske fosforformer i vandløb, søer og fjorde.

### **5.4 Foranstaltninger mod tabet af fosfor fra landbruget**

#### *Identifikation af arealer med særlig stor risiko for fosfortab og tiltag til at reducere tabet fra disse*

Som omtalt eksisterer der områder, hvorfra fosfortabet er særligt stort, fordi en effektiv transportvej forbinder et område med stort indhold af transporterbart fosfor med vandmiljøet. Sikker identifikation af sådanne områder og præcis diagnose for, hvorfor og hvordan fosforet tabes, er forudsætninger for at sætte ind med tiltag, der reducerer fosfortabet både hurtigt og effektivt.

Et overordnet vidensbehov er derfor udvikling af integrerede planlægnings-/rådgivningsværktøjer til identifikation af risikoområder. Værktøjerne bør kunne håndtere forskellige dyrkningsforhold. Sådanne planlægningsværktøjer vil typisk være baseret på simuleringsmodeller på bedriftsniveau. For at sådanne værktøjer får den fornødne deltajeringsgrad og præcision kræves indgående kendskab til hvilke fysiske og kemiske faktorer, der påvirker tabet af fosfor til vandmiljøet under forskellige jordbunds- og dyrkningsforhold, hvilket udløser en række mere specifikke forskningsbehov:

Forsknings- og udviklingsfelterne kan grupperes i følgende underområder:

- Kortlægning af danske jordes evne til at binde og transportere fosfor
- Studier af fosforomsætning og transport i jord i relation til jordtype og vandbevægelse samt dyrkningsforhold
- Udvikling af modeller både på systemniveau til beskrivelse af fosforomsætningen i landbruget og på delniveau til beskrivelse af fosforomsætning og transport i rodzonen
- Udvikling og dokumentation af effektive foranstaltninger til begrænsning af fosfortabet især fra risikoområder, herunder bl.a. begrænsning af nedvaskningstab, bufferzoner omkring vandløb og søer, begrænsning af brinkerosion og vurdering af nye udbringningsstrategier for slam, gylle og gylleseperater etc
- Udvikling af beslutningsstøtteværktøjer til udpegnig af risikoområder for fosfortab og til målretning af tiltag.

### **5.5 Økonomiske konsekvenser af en indsats til forbedring af fosforhusholdningen**

Der er behov for analyser af omkostningerne ved realisering af de forskellige strategier for reduktion i fosfortabet samt analyse af forskellige styringsmidler til at implementere disse strategier. Problemstillingerne vedrørende fosfor har hidtil kun været genstand for meget beskedne økonomiske analyser, og det anses derfor for væsentligt at skabe et sammenhængende miljøøkonomisk vidensgrundlag på dette område.

Sammenkædningen af de miljømæssige og økonomiske effekter af forskellige tiltag bidrager til at belyse mulighederne for at minimere omkostningerne ved at nå en given reduktion i fosfortabet.

Analysen af forskellige styringsmidlers omkostningseffektivitet omfatter balancen mellem ønsket om at opfylde en fastsat målsætning så præcist som muligt og ønsket om at minimere omkostningerne ved reguleringen. I denne sammenhæng analyseres relevante styringsmidler f.eks. på grundlag af de af OECD opstillede kriterier omfattende:

- fleksibilitet, dvs. at aktørernes muligheder for valg af handlinger gøres så fleksible som muligt
- gennemskuelighed, dvs. at styringsmålenes effekter kan opgøres, evalueres og kontrolleres så klart og entydigt som muligt
- sikkerhed, dvs. at der er sikkerhed for at miljømålene opnås.



## 6. ORDLISTE

**ab dyr** – fra dyr

**ab lager** – fra lager

**baggrundstab** – tabet af opløste og partikelbundne fosforfraktioner fra land til overfladevand målt i skov- og naturoplande med mindre end 10% dyrkning, uden udledninger fra større punktkilder (svarende til 30 personækvivalenter) og belastet med den nuværende atmosfæriske deposition af fosfor

**behov** – det forsøgsmæssigt dokumenterede fysiologiske behov for fosfor til dækning af dyrenes livsytringer på optimalt niveau, så mangelsymptomer undgås, normalt regnes i absorberet fosfor

**behovsbetinget fosfortilførsel landbrugsjord** – Gødsning med fosfor efter afgrødernes behov. Det vil betyde, at gødskningen justeres både efter jordens indhold af plantetilgængeligt fosfor og den aktuelle afgrødes behov.

**biotilgængelighed (husdyr)** - synonym med fordøjelighed

**diffust fosfortab** – omfatter tab fra diffuse kilder (dyrkningsbidrag, spredt bebyggelse og baggrundsbidrag)

**dyrkningsbidraget** – det dyrkningsbetingede tab af fosfor fra landbrugsarealer

**erodibilitet** – jordens erosionssårbarhed

**FE** – foderenhed er en enhed, der angiver energiindholdet i foder til husdyr. Hos svin benævnes foderenhederne FEs. En foderenhed er defineret som værdien af 0,85 kg bygtørstof.

**fladeerosion** – erosion, hvor vandet løber fladedækkende ned over jorden

**fodringsanbefalinger** – se fodringsnormer

**fodringsnormer** – praktiske anbefalinger vedr. foderets indhold af fosfor; er baseret på dyrenes fysiologiske behov + fordøjelighed + en sikkerhedsmargin

**fordøjelighed** – andelen af foderets fosfor, som absorberes

**fordøjeligt** – den del af foderets indhold af fosfor, der frigøres til absorption

**fosfat** – den dominerende kemiske form for fosfor i naturlige systemer

**fosforbindingskapacitet i jord** – den mængde fosfor som en jord maksimalt kan binde.

**fosformangel (husdyr)** – opstår ved for lav tildeling af fosfor med foderet; medfører nedsat produktion og sundhed

**fosformætningsgrad** – udtrykker, hvor stor en del af jordens samlede bindingskapacitet for fosfor der allerede er beslaglagt.

**fosforoverskud** – differencen mellem tilførsel og fraførsel af fosfor

**fosforstatus (jord)** – et udtryk der ofte bruges for at udtrykke sig generelt om jordens indhold af og bindingsforhold for fosfor. Fosforstatus med hensyn til plantetilgængelighed måles således i dag i Danmark med fosfortallet. Hvis man ønsker at udtrykke en jordens fosforstatus med hensyn til risiko for tab af fosfor til vandmiljøet, er det ofte udtryk for fosformætningsgraden man hentyder til – eller til jordens totale indhold af fosfor.

**fosforsyretal** – også kaldet Ft. Metode til at angive plantetilgængeligt fosfor i jord. Metoden var standard i Danmark frem til 1987. Den bygger på ekstraktion af jorden med fortyndet svovlsyre. En enhed svarer til ekstraktion af 1 mg fosfor fra 33.3 gram jord. Ftal under 5 blev betragtet som lave, mellem 5 og 8 som passende og over 8 som høje.

**fosfortal** – Også kaldet Pt. Metode til at angive plantetilgængeligt fosfor i jord. Metoden har været standard i Danmark siden til 1987. Den bygger på ekstraktion af jorden med en Natriumbicarbonatopløsning. En enhed svarer til 1 mg fosfor ekstraheret fra. 100 g jord. Fosfortal under 2 betragtes som lave, mellem 2 og 4 som passende og over 4 som høje.

**fosforudledning** – fosfor der tilføres overfladevand fra forskellige kilder, for eksempel udledninger fra rensesanlæg, dambrug og landbrug

**FTU** – fytaseenhed, som er et mål for fytases aktivitet

**fysiologisk behov** – se behov

**færdigfoder** – foder, som er blandet og parat til udfodring

**hjemmeblandet foder** – foder, der fremstilles på bedriften; varmebehandles ikke

**højrisikoområder** - arealer og områder, hvorfra der er særlig stor risiko for tab af fosfor til vandmiljøet

**kildeområde** – områder med højt indhold af mobiliserbart fosfor

**KLS** – et (dimensionsløst) udtryk for en lokalitets potentielle erosionsrisiko

**kritisk fosformætningsgrad** – den mætningsgrad der, hvis den overstiges, betyder, at jorden understøtter en koncentration af fosfor i jordvæske, som er højere, end hvad der er acceptabelt i det omgivende vandmiljø

**Kvadratnettet** – et landsdækkende net af 830 målepunkter for udtagning af jordprøver med en indbyrdes afstand af 7 km

**LOOP** – LandOvervågningsOplande, en del af NOVA

**makroporer** – større porer i jorden som regnormegange, rodgange, sprækker mv.

**mychorriza** – svampe, som kan fremme planternes fosforoptagelse især på jorde med lav fosforstatus

**mætningsgrad** – se fosformætningsgrad

**nedvaskning** – transport af opløst eller partikelbundet fosfor ned gennem jorden til dræn og øvre grundvand

**NOVA** – Det Nationale Program for Overvågning af Vandmiljøet

**opløst fosfor** – fosfor opløst i jordvæsken eller vand. Kan både være organisk og uorganisk

**organogene jorde** – jorde med højt indhold af organisk stof

**orthofosfat** – fosforationen:  $\text{PO}_4^{3-}$ , se også fosfat

**partikulært fosfor** – fosfor bundet til små (jord)partikler. Kan både være organisk og uorganisk

**plantetilgængeligt fosfor** – den pulje af fosfor i jorden som er tilgængelig kan optages af planterne såfremt andre vækstvilkår for planterne er optimale

**punktkilder** – enkeltkilder til fosfortab, såsom dambrug, rensningsanlæg og industri

**reduceret jordbearbejdning** – metoder, som medfører mindre bearbejdning af jorden end normal jordbearbejdning, ofte undlades pløjning

**rilleerosion** – erosion, hvor vandet samler sig og strømmer af i riller på jordoverfladen

**ripariske bufferzoner** – beskyttelseszoner mod overfladisk afstrømning og erosionstab langs vandløb

**risikoområder** – arealer og områder, hvorfra der er stor risiko for tab af fosfor til vandmiljøet

**sikkerhedsmargin** – den mængde, der tillægges det forsøgs-mæssigt bestemte behov ved udformningen af de fodringsanbefalingerne for praksis; skal tage højde for usikkerhed, der kan opstå i forbindelse med bl.a. foderfremstilling og manglende kendskab til det aktuelle foders fosforindhold og fordøjeligheden af fosfor

**sugeceller** – udstyr til udtagning af jordvæske fra rodzonen

**tabsposter** – de forskellige måder, som fosfor tabes på fra dyrkede og udyrkede landarealer, f.eks. ved erosion, overfladestrøming, nedvaskning til dræn, mv.

**tilgængelighed (husdyr)** - synonym med fordøjelighed

**totalfosfor (jord og vand)** – Det totale indhold af fosfor i en jord- eller vandprøve, i tabssammenhæng i vandprøver svarer det til summen af opløst og partikulært fosfor.

**transportvej** – forbindelsen mellem et kildeområde og vandmiljøet ad hvilken fosforet transporteres

**tørdeposition** – nedfald af fosfor bundet til partikler over land og vand

**udvaskning** – se nedvaskning

**vandinfiltration** – vandets nedsivning gennem jorden

**våddeposition** – tilførsel af fosfor med nedbøren over land og vand

## 7. REFERENCER

- AFRC (1991). AFRC Technical Committee on Responses to Nutrients, Report 6. A reappraisal of the calcium and phosphorous requirements of sheep and cattle. *Nutrition Abstracts and Reviews (Series B)*, 61, 573-612.
- Andersen, J.M., Poulsen, H.D., Børsting, C.F., Rom, H.B., Sommer, S.G. & Hutchings, N.J. (2001). Ammoniakemission fra landbruget siden midten af 80'erne. Faglig rapport fra DMU nr. 353.
- ARC (1965). *The Nutrient Requirements of Farm Livestock: No. 1 Ruminants*. Agricultural Research Council. HMSO, London, p. 14-85.
- Areldatakontoret (1985). *Afvandingsundersøgelsen i Danmark*. Landbrugsministeriet. Areldatakontoret. 149 sider + 140 sider bilag.
- Askegaard, M. & Mikkelsen, G. (1995). Grundlag for beregning af næringsstofbalancer i økologisk jordbrug. I: Olesen og Vester (red.). SP rapport 9. Statens Planteavlsvforsøg, Foulum, 143 s.
- Aslyng, H.C (1980). Afvanding i jordbruget. *Kulturteknik III*, 3. Udgave, DSR, København. 228 s.
- Aura, E. (2003). Personlig meddelelse.
- Austin, S., Bingham, E.T., Koegel, R.G., Mathews, D.E., Shanan, M.N., Straub, R.J. & Burgess, R.R. (1994). An overview of a feasibility study for the production of industrial enzymes in transgenic alfalfa. *Recom DNA Tech* 721, 234-244.
- Barret, T. & Stendal, M. (red.) (2003). Årsrapport 2002, Dansk Kvæg. Landbrugets Rådgivningscenter, 56 s.
- Beauchemin, S., Simard, R.R. & Cluis, D. (1996). Phosphorus sorption-desorption kinetics of soil under contrasting land uses. *J. Environ. Qual.* 25, 1317-1325.
- Beven, K. & Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *J. Hydrol.* 249, 11-29.
- Blaauw, D., Sissingh, H.A. & Chardon, W.J. (1988). Verdeling van fosfaat im bodemprofielen in Nederland. Internal report Inst. Soil Fert. Research, 25 pp.
- Borggaard, O.K., Jørgensen, S.S., Møberg, J.P. & Raben-Lange, B. (1990). Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. *J. Soil Science* 41, 443- 449.
- Borggaard, O.K., Møberg, J.P. & Sibbesen, E. (1991). Indhold og mobilitet af fosfor i jord. I: Frier, J.O. & Christensen, J.F. (red.): Kvælstof, fosfor og organisk stof i jord- og vandmiljøet. Rapport fra konsensuskonference 31. januar til 4. februar 1991. Undervisningsministeriets Forskningsafdeling, 4.1-4.24.
- Bossen, D., Kjeldsen, A.M. & Aaes, O. (2000). Mineralindhold i grovfoder fra høsten år 2000. LK-meddelelse nr. 566. Landskontoret for Kvæg. s. 2.

- Bravo, D., Meschy, F., Bogaert, C. & Sauvant, D. (2000). Ruminant phosphorus availability from several feedstuffs measured by the nylon bag technique. *Reprod. Nutr. Develop.* 40, 149-162.
- Breeuwsma, A. & Reijerink, G.G.A. (1992). Phosphate-saturated soils: a 'new' environmental issue. In: ter Meulen, G.R.B., Stiglani, W.M., Salomons, W., Bridges, E.M. and Imeson, A.C. (eds.) *Chemical time bombs. Proc. of the European conference, Veldhoven. Foundation for Ecodevelopment, Hoofddorp*, pp 79-85.
- Brinch-Pedersen, H. (upubliceret).
- Brinch-Pedersen, H. & Poulsen, H.D. (upubliceret).
- Brinch-Pedersen, H., Hatzack, H., Sørensen, L.D. & Holm, P.B. (2003). Concerted action of endogenous and heterologous phytase on phytic acid degradation in transgenic wheat (*Triticum aestivum L.*), *Transgenic Res.* 12, 649-659.
- Brinch-Pedersen, H., Olesen, A., Rasmussen, S.K. & Holm, P.B. (2000). Generation of transgenic wheat (*Triticum aestivum L.*) for constitutive accumulation of an *Aspergillus* phytase. *Mol. Breed.* 6, 195-206.
- Brinch-Pedersen, H., Sørensen, L.D. & Holm, P.B. (2002). Engineering crop plants: getting a handle on phosphate. *Trends in Plant Sci.* 7, 118-125.
- Brookes (1984). Recommendations bearing the sinuosity of Danish stream channels. Discussion paper, 130 s. Miljøstyrelsen Ferskvandslaboratorium, nu Danmarks Miljøundersøgelser, Silkeborg.
- Bøgestrand, J. (red.) (2002). Vandløb 2001. NOVA 2003. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU 422 (elektronisk): 39 s.
- Carlson, D. & Poulsen, H.D. (2003). Phytate degradation in soaked and fermented liquid feed - Effect of diet, time of soaking, heat treatment, phytase activity, pH and temperature. *Anim. Feed Sci. Tech.* 103, 141-154.
- Cerdan, O., Poesen, J., Bovers, G., Saby, N., Le Bissonnais, Y., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F.J.P.M. & Roxo, M.J. (2003). Soil Erosion in Europe: interrill and rill erosion. International symposium on soil erosion and global change. Results and new perspectives, COST Action 623. Final Meeting, Budapest, Hungary 5-8 July.
- Chardon, W. & van Faassen, H.G. (1999). Soil indicators for critical source areas of phosphorus leaching. Wageningen: The Netherlands Integrated Soil Research Programme. Programmebureau Geïntegreerd Bodemonderzoek deel 22.34, pp.2 app.
- Chardon, W. & Schoumans, O.F. (red.) (2002). Phosphorus losses from agricultural soils: Processes at the field scale. COST Action 832. Alterra, Wageningen, The Netherlands. pp. 137.
- Chardon, W., Oenema, O., del Castilho, P., Vriesema, R., Japenga, J. & Blaauw, D. (1997). Organic phosphorus in solutions and leachates from soils treated with animal slurries. *J. Environ. Qual.* 26, 372-378.
- Chepil, W.S., Siddoway, F.H. & Armbrust, D.V. (1962). Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *J. Soil Water Conserv.* 17, 162-165.

- Christensen, J.H. & Christensen, O.B. (2003). Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe. *Nature* 421, 805-806.
- Clausen, S. (upubliceret). En vurdering af hvilke konsekvenser strammere harmonikrav får for kvægbruget. Landbrugets Rådgivningscenter, 2001.
- Dalgaard, T. & Kyllingsbæk, A. (2005, in press) Agroøkohistorien og det agrare landskab 1900-2000. Kapitel 11 i en bog fra forskningsrådsprojektet Agrar 2000. Århus Universitetsforlag.
- Dalgaard, T. & Nielsen, A.H. (2001). Fordele ved næringsstofmæssige samarbejder mellem husdyr- og planteavlbedrifter. Studielandbrug Årsrapport. p. 34-38. Landbrugets Rådgivningscenter, Skejby.
- Dalgaard, T. & Olsen, P. (2002). Fosfortab og Akkumulering. I: Hermansen, J. (red.): Landbrugsstruktur og miljøforhold for svineproduktionen i Danmark. DJF rapport 43. s. 30-32. Danmarks JordbrugsForskning, Foulum.
- Danmarks Statistik (2002). Landbrug 2001. Statistik om landbrug, gartneri og skovbrug. Danmarks Statistik, København. 274 s.
- de Jonge, L.W., Jakobsen, O.H. & Edlefsen, O. (1999). Vandstrømning i sandjord. Grøn Viden markbrug nr. 205. Danmarks Jordbrugsforskning. 4 s.
- de Jonge, L.W., Moldrup, P., Schelde, K. & Rubæk, G. (2002). Field variations in colloid facilitated transport of phosphorus. In: de Jonge, L.W., Moldrup, P., & Jacobsen, O.H. (eds.). Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils and sediments. DIAS report, Plant production 80, 227-236.
- Denbow, D.M., Graubau, E.A., Lacy, G.H., Kornegay, E.T., Russell, D.R. & Umbeck, P.F. (1998). Soybeans transformed with a fungal phytase gene improve phosphorus availability for broilers. *Poul. Sci.* 77, 878-881.
- Dillaha, T.A. & Inamdar, S.P. (1997). Buffer zones as sediment traps or sources. In: Haycock, N.E., Burt, T.P., Goulding, K.W.T. and Pinay, G. (eds.) Buffer zones: Their processes and potential in water protection. Quest Environmental, Harpenden, UK, 33-53.
- Dillaha, T.A., Reneau, R.B., Mistaghimi, S. & Lee, D. (1989). Vegetation filter strips for agricultural nonpoint source pollution control. *Transactions of the ASAE* 32, 513-519.
- DJFGeodata. [www.djfgeodata.dk](http://www.djfgeodata.dk).
- Djordjic, F., Bergström, L. & Ulén, B. (2002). Phosphorus losses from a structured clay soil in relation to tillage practices. *Soil Use Manage.* 18, 79-83.
- Djordjic, F., Ulén, B. & Bergström, L. (2000). Temporal and spatial variations of phosphorus losses and drainage in a structured clay soil. *Water Res.* 34, 1687-1695.
- Djurhuus, J. (2003). Notat. Personlig meddelelse.
- Djurhuus, J., Hansen, B., Højsgaard, S., Rasmussen, H.H., Heckrath, G., Olsen, P. & Jakobsen, O.H. (2005). Water erosion in Denmark can be predicted by EROSPREDICT.I. Data and the influence of the estimated parameters (submitted).

- DMU's Arealinformationssystem (AIS). [www.dmu.dk/Udgivelser/kort\\_og\\_geodata/AIS](http://www.dmu.dk/Udgivelser/kort_og_geodata/AIS).
- Dormaar, J.F. (1987). Quality and value of wind-movable aggregates in chernozemic Ap horizons. *Can. J. Soil Sci.* 67, 601-607.
- Edelsten, D. (1988). Composition of milk. In: Cross, H.R & Overby, A.J. (eds.): *World Animal Science*, B3, Meat Science, Milk Science and Technology, Chapter 6. Elsevier Science Publishers B.V.
- Eeckhout, W. & De Paepe, M. (1994). Total phosphorus, phytate-phosphorus and phytase activity in plant feedstuffs. *Anim. Feed Sci. Tech.* 47, 19-29.
- Eghball, B., Bingard, G.D. & Baltensperger, D.D. (1996). Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application. *J. Environ. Qual.* 25, 1339-1343.
- Ellermann, T., Hertel, O. & Skjøth, C.A. (2000). Atmosfærisk deposition 1999. NOVA 2003. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU 332, 120 s.
- Eriksen, J. & Kristensen, K. (2001). Nutrient excretion by outdoor pigs: a case study of distribution, utilisation and potential for environmental impact. *Soil Use Manage.* 17, 21-29.
- Eriksen, J., Hansen, J., Kyllingsbæk, A., Sibbesen, E., Petersen, S.O., Djurhuus, J., Vinther, F.P., Heidmann, T. & Hansen, B. (1995) *Næringsstofbalancer på markniveau i økologisk kvægbrug og planteavl. I: Olesen, J. og Vester, J. (red.). SP rapport 9. Statens Planteavlsvorsøg, Foulum, 143 s.*
- Ertl, D.S., Young, K.A. & Raboy, V. (1998). Plant genetic approaches to phosphate management in agricultural production. *J. Environ. Qual.* 27, 299-304.
- Falkum, Ø., Kronvang, B. & Svendsen, L.M. (1997). Stofftilbageholdelse på oversvømmede enge. *Vand & Jord* 4(3), 125-129.
- Forsberg, C.W. (2003). Personlig meddelelse.
- Fox, T.R., Comerford, N.B. & McFee, W.W. (1990) Kinetics of phosphorus release from spodosols: Effects of oxalate and formate. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 54, 1441-1447.
- Gaynor, J.D. & Findlay, W.I. (1995). Soil and phosphorus loss from conservation and conventional tillage in corn production. *J. Environ. Qual.* 24, 734-741.
- Gburek, W.J., Sharpley, A.N., Heathwaite, L. & Folmar, G. (2000). Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index. *J. Environ. Qual.* 29, 130-144.
- Golovan, S.P., Meidinger, R.G., Ajakaiye, A., Cottrill, M., Wiederkehr, M.Z., Barney, D.J., Plante, C., Pollard, J.W., Fan, M.Z., Hayes, M.A., Laursen, J., Hjorth, J.P., Hacker, R.R., Phillips, J.P. & Forsberg, C.W. (2001). Pigs expressing salivary phytase produce low-phosphorus manure. *Nat. Biotech.* 19, 741-745.
- Grant, R., Blicher-Mathiesen, G., Andersen, H.E., Grewy Jensen, P., Pedersen, M. & Rasmussen, P. (2002). *Landovervågningsoplande 2001. NOVA 2003. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU 420 (elektronisk), 125 s.*



- Grant, R., Jensen, P.G., Andersen, H.E., Laubel, A., Dejbjerg, C., Rasmussen, H. & Rasmussen, P. (1996a). Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1995. Landovervågningsoplande. Faglig rapport fra DMU nr 175. Miljø og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser.
- Grant, R., Laubel, A., Kronvang, B., Andersen, H.E., Svendsen, L.M. & Fuglsang, A. (1996b). Loss of dissolved and particulate phosphorus from arable catchments by subsurface drainage. *Water Res.* 30, 2633-2642.
- Groenendijk, P. (2002). Phosphorus leaching models. In: Kronvang, B. (ed.): Diffuse phosphorus leaching losses at the catchment scale. COST Action 832. Alterra, Wageningen, The Netherlands. p. 41-44. [www.stone.alterra.nl](http://www.stone.alterra.nl).
- Guelph Transgenic Pig Research Program (2001). Enviropig™ a genetically modified environmentally friendly pig that utilizes plant phosphorus more efficiently. <http://www.uoguelph.ca/enviropig/>
- Gundersen, P. (2003). Personlig meddelelse.
- Hagelberg, E. (2003). Personlig meddelelse.
- Halberg, N. & Kristensen, I.S. (1997). Expected crop yield loss when converting to organic dairy farming in Denmark. *Biol. Agric. Hort.* 14, 25-41.
- Hansen, B. (1981). Drænvandskvantitet og -kvalitet I Susåens opland. Nr. 19 SUSÅ-H, København. Dansk Komite for Hydrologi.
- Hansen, B. (1990). Landbrugets gødnings- og arealanvendelse i 1983 og 1989. Interviewundersøgelser i syv mindre landbrugsområder. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen nr. A21.
- Hansen, B. & Olesen, S.E. (2005). Dræning og grundvandsdannelse. *Vand og Jord* 12, 19-22.
- Hansen, B., Djurhuus, J., Christensen, N., Jacobsen, O.S., & Hoffmann, C.C. (1991). Analyse af jordvandssammensætning – metodesammenligning. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen Nr. A17, Miljøministeriet.
- Hansen, B., Hansen, A.C., Hoffmann, C.C. & Nielsen, H. (1990). Vand- og stofbalance på lavbundsjord. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, nr. C14.
- Hasholt (1988). Transport af partikulært fosfor i danske vandløb. Nordisk Hydrologisk Program, NHP-rapport nr. 22, 243-251.
- Hasholt, B., Madsen, H.B., Kuhlman, H., Hansen, A.C. & Platou, S.W. (1990). Erosion og transport af fosfor til vandløb og søer. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen Nr. C12.
- Haynes, R.J. (1984). Lime and phosphate in the soil-plant system. *Advan. Agron.* 37, 249-315.
- Heathwaite, A.L., Fraser, A.I., Johnes, P.J., Hutchins, M., Lord, E. & Butterfield, D. (2003). The Phosphorus Indicator Tool: a simple model of diffuse P loss from agricultural land to water. *Soil Use Manag.* 19, 1-11.
- Heckrath, G., Brookes, P., Poulton, P. & Goulding, K.W.T. (1995). Phosphorus leaching from soils containing different P concentrations in the Broadbalk experiment. *J. Environ. Qual.* 24, 904-910.

- Heckrath, G., Djurhuus, J. & Halekoh, U. (2002a). Jordbearbejdningserosion. Grøn Viden, Markbrug nr. 251. Danmarks Jordbrugsforskning. 4 s.
- Heckrath, G., Grant, R., Laubel, A. & Jensen, M.B. (2000). Nedvaskning af fosfor. I: Jacobsen, O.H. & Kronvang, B. (red.): Tab af fosfor fra landbrugsjord til vandmiljøet. DJF rapport nr. 34, 31-44.
- Heckrath, G., Rubæk, G., de Jonge, L.W., Sehested, J. & Poulsen, H.D. (2002b). Mobile P in undisturbed soil columns amended with different animal manures. In: de Jonge, L.W., Moldrup, P., Jacobsen, O.H. (eds.): Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils and sediments. DIAS report, Plant production no. 80, 227-236.
- Hermansen, J. (upubliceret). Sporelementer i økologisk eller konventionelt produceret mælk og æg.
- Hermansen, J.E. (2003). Personlig meddelelse.
- Hermansen, B. & Jakobsen, P.R. (2000). Danmarks digitale jordartskort 1:25.000. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, v. 2.0, GEUS rapport 81, 2000.
- Hermansen, B., Petersen, S.A.S. & Bjerregaard, C. (1999). Digital kort over Danmarks jordarter 1:200.000. Geologisk kort over de overfladenære jordarter i Danmark. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, v. 1.0, GEUS rapport 47, 1999.
- Hickey, R., Smith, A. & Jankowski, P. (1994). Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID: Computers, Environment and Urban Systems, v. 18, no. 5, 365-380.
- Hoffmann, C.C. & Ovesen, N.B. (2003). Næringsstofsætning og -tab ved ekstensiv græsning på lavbundsarealerne ved Fussingø. I: Hald, A.B., Hoffmann, C.C. og Nielsen, L. (red.): Ekstensiv afgræsning af ferske enge – botanisk diversitet, småpattedyr, miljø og produktion. DJF rapport, Markbrug 91.
- Hoffmann, C.C., Kronvang, B. & Grant, R. (2003). Ophør af omdrift på lavbundsarealer. Notat fra Danmarks miljøundersøgelser, Afd. f. Ferskvandsøkologi. 18 sider.
- Holm, P.B. (2003). Personlig meddelelse.
- Hovenjürgen, M., Rodehutschord, M. & Pfeffer, E. (2003). Effect of fertilization and variety on digestibility of phosphorus from plant feedstuffs in pigs. *J. Anim. Feed Sci.* 12, 83-93.
- Jacobsen, O.H., Laubel, A., Hansen, B., Heckrath, G. & Kronvang, B. (2000). Erosion og fosfortab. I: Jacobsen, O.H. og Kronvang, B. (red.): Tab af fosfor fra landbrugsjord til vandmiljøet. DJF rapport 34, 45-52.
- Jamroz, D., Orda, J., Skorupinska, J., Wiliczkiwicz, A., Wartecki, T., Zylka, R. & Klünter, A.-M. (2003). Reaction of laying hens to low phosphorus diets and addition of different phytase preparations. *J. Anim. Feed Sci.* 12, 95-110.
- Jensen, J.P., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Bjerring Olsen, R., Landkildeshus, F., Lauridsen, T.L., Sortkjær, L. & Poulsen, A.M. (2001). Søer 2000. NOVA 2003. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU 377 (elektronisk), 104 s.
- Jensen, M.B., Hansen, H.C.B., Magid, B., Nielsen, N.E. (1999). Phosphate leaching from intact soil column in response to reducing conditions. *Water, Air Soil Pollut.* 113, 411-423.

- Jensen, M.B., Olsen, T.B., Hansen, H.C.B. & Magid, J. (2000). Dissolved and particulate phosphorus in leachate from structured soil amended with fresh cattle-faeces. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 56, 253-261.
- Johansen, K. & Poulsen, H.D. (2003a). Svins fosforudnyttelse. Hvilken effekt kan forventes af fyta-seltsætning – review. *Grøn Viden, Husdyrbrug* 30, Danmarks JordbrugsForskning, 6 s.
- Johansen, K. & Poulsen, H.D. (2003b). Substitution of inorganic phosphorus in pig diets by microbial phytase supplementation – a review. *Pig News and Information* 24, 77N-82N.
- Johansen, K. & Poulsen, H.D. (2004). Fodringsmæssige muligheder for at reducere fosforudskillelsen fra slagtekyllinger og konsumægshøner – review. *DJF-rapport – Husdyrbrug* 62, 37 s.
- Jørgensen, L., Dahl, J., Jensen, B.B. & Poulsen, H.D. (1999). Effekt af ekspandering, pelletering og formalingsgrad på salmonella, produktionsresultater og mavetarmsundhed hos slagtesvin samt fytaseaktivitet og vitaminstabilitet i foder. *Meddelelse nr. 426, Landsudvalget for Svin*, 24 s.
- Jørgensen, L., Poulsen, H.D. & Tellerup, H.J. (1997). Behov for fordøjeligt fosfor til smågrise (4-10 uger). *Meddelelse nr. 360, Landsudvalget for Svin, Den rullende afprøvning*. 5 pp.
- Jørgensen, U. (2003). Personlig meddelelse.
- Kelstrup, N. & Hansen, B. (1986). Arealanvendelse og geologi – nitrat i grundvand. *Miljøprojekt nr. 73, Miljøstyrelsen*.
- Kemme (1998). Phytate and phytases in pig nutrition. Impact on nutrient digestibility and factors affecting phytase efficacy. Ph.D. Thesis Lelystad, The Netherlands, 166 s.
- Kertz, A.F. (1998). Variability in delivery of nutrients to lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81:11, 3075-3084.
- Kim, J.C., Mullan, B.P., Selle, P.H. & Pluske, J.R. (2002). Levels of phosphorus, phytate-phosphorus, and phytase activity in three varieties of western australian wheats in response to growing region, growing season and storage. *Aust. J. Agric. Res.* 53, 1361-1366.
- Kjeldsen, A.M. (upubliceret).
- Kjeldsen, A.M. & Aaes, O. (1999). Produktionsresultater i besætninger med periodefoderkontrol (PFK). *Temadag om aktuelle fodringsspørgsmål, mandag den 30. august 1999. Landbrugets Rådgivningscenter*, 31-41.
- Kjellerup, V & Kofoed, A.D. (1979). Kvælstofgødskningens indflydelse på drænvandets indhold af plantenæringsstoffer. *Beretning nr 1465, Statens Planteavl-forsøg*.
- Kjellerup, V. & Kofoed, A.D. (1983). Kvælstofgødskningens indflydelse på udvaskning af plantenæringsstoffer fra jorden. *Lysimeterforsøg med anvendelse af 15N. Tidsskrift for planteavl* 87, 1-22.
- Knudsen, L. (1998). *Pas på fosfor. Landbrugsts Rådgivningscenter, Århus, Danmark*.
- Knudsen, L. (2000). Fosforproblematikken set ud fra et landbrugsmæssigt synspunkt. I: Jacobsen, O.H. & Kronvang, B. (red.): *Tab af fosfor fra landbrugsjord til vandmiljøet. DJF rapport* 34, 89-95.

- Kommissionen. Fortegnelse over tilsætningsstoffer, der er tilladt i foder offentliggjort i henhold til artikel 9t, litra b), i Rådets direktiv 70/524/EØF om tilsætningsstoffer til foderstoffer.
- Kort og Matrikelstyrelsen. [www.kms.dk](http://www.kms.dk).
- Kronvang, B. & Bruhn, A.J. (1996). Choice of sampling strategy and estimation method when calculating nitrogen and phosphorus transport in small lowland streams. *Hydrol. Process.* Vol. 10, 1483-1501.
- Kronvang, B., Grant, R., Laubel, A., Iversen, H.L., Svendsen, L.M. & Hansen, B. (2000). Kan vi forklare fosfortransporten i vandløb med tabet fra markerne? I: Jacobsen, O.H. og Kronvang, B. (red.): Tab af fosfor fra landbrugsjord til vandmiljøet. DJF rapport 34, 63-72.
- Kronvang, B., Grant, R., Laubel, A.L. & Pedersen, M.L. (2002) Quantifying sediment and nutrient pathways within Danish agricultural catchments. In: Haygarth, P.M. and Jarvis, S.C. (eds.): *Agriculture, Hydrology and Water Quality*, CAB International, 281-301.
- Kronvang, B., Hoffmann, C.C., Svendsen, L.M., Windolf, J., Jensen, J.P. & Dørgé, J. (1999). Retention of nutrients in river basins. *Aquat. Ecol.* 33, 29-40.
- Kronvang, B., Iversen, H.L., Jørgensen, J.O., Paulsen, I., Jensen, J.P., Conley, D., Ellermann, T., Laursen, K.D., Wiggers, L., Flindt Jørgensen, L. & Stockmarr, J. (2001). Fosfor i jord og vand. Udvikling, status og perspektiver. Afdeling for Vandløbsøkologi, Afdeling for Atmosfærisk Økologi, Afdeling for Havøkologi og Afdeling for Sø- og Fjordøkologi. 88 s. Faglig rapport fra DMU 380. (Findes også på: [http://www.dmu.dk/1\\_viden/2\\_Publikationer/3\\_fagrapporter/rapporter/FR380\\_samlet.pdf](http://www.dmu.dk/1_viden/2_Publikationer/3_fagrapporter/rapporter/FR380_samlet.pdf)).
- Kronvang, B., Laubel, A. & Grant, R. (1997). Suspended sediment and particulate phosphorus transport and delivery pathways in an arable catchment, Gelbæk stream, Denmark. *Hydrol. Process.* 11, 627-642.
- Kronvang, B., Laubel, A., Larsen, S.E., Andersen, H.E. & Djurhuus, J. (2005). Buffer zones as a sink for sediment and phosphorus between the field and stream: Danish field experiences. *Water Science and Technology* (in press).
- Kronvang, B., Olsen, P., Andersen, H.E., Bøcher, P.K., Gyldenkerne, S., Hansen, J.F. & Djurhuus, J. (2003). Udpregning af risikoområder og analyse af tiltag, der kan reducere fosfortabet via jorderosion og overfladisk afstrømning til overfladevand. Projekt rapport til Skov- og Naturstyrelsen.
- Kuhlman, H. (1986). Vinden og landbruget. I: Jensen, K.M. og Reenberg, A. (red.) *Landbrugsatlas Danmark*. København, CA Reitzels Forlag, 17-23.
- Kyllingsbæk, A. (2003). Personlig meddelelse.
- Landsudvalget for Svin (2002). Info Svin - foder – mineraler – fosfor – norm.
- Larsen, P. & Sørensen, M.B. (1996) Geografiske data hos Afd. for Arealanvendelse. SP rapport 6. Landbrugs- og Fiskeriministeriet, Statens Planteavlsvforsøg.
- Larson, S.R., Rutgen, J.N., Young, K.A. & Raboy, V. (2000). Isolation and genetic mapping of a non-lethal rice low phytic acid mutation. *Crop Sci.* 40, 1397-1405.

- Laubel, A.L., Svendsen, L.M. & Kronvang, B. (1999). Stream bank erosion in a Danish lowland river system. *Hydrobiol.* 410, 279-285.
- Laubel, A.R., Kronvang, B., Hald, A.B. & Jensen, C. (2003). Hydromorphological and biological factors influencing sediment and phosphorus loss via bank erosion in small lowland rural streams in Denmark. *Hydrol. Process.* 17, 3443-3463.
- Laubel, A.R., Kronvang, B., Larsen, S.E., Pedersen, M.L. & Svendsen, L.M. (2000). The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer. In: Stone, M. (ed.): IAHS Publication no. 263, 75-82.
- Laursen, K.D. & Kronvang, B. (2001). Punktkildernes betydning for fosforforureningen af overfladevand. I: Kronvang, B., Iversen, H.L., Jørgensen, J.O., Paulsen, I., Jensen, J.P., Conley, D., Ellermann, T., Laursen, K.D., Wiggers, L., Flindt Jørgensen, L. & Stockmarr, J. (red.): Fosfor i jord og vand. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU 380, 37-44.
- Lee, D., Dillaha, T.A. & Sherrard, J.H. (1989). Modelling phosphorus transport in grass buffer strips. *J. Environ. Eng.* 115, 409-427.
- Leinweber, P., Meissner, R., Eckhardt, K.U. & Steeger, J. (1999). Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *Europ. J. Soil Sci.* 50, 413-424.
- Li, Y.C., Ledoux, D.R. & Veum, T.L. (2001a). Bioavailability of phosphorus in low phytic acid barley. *J. Appl. Poultry Res.* 10, 86-91.
- Li, Y.C., Ledoux, D.R. & Veum, T.L. (2001b). Low phytic acid barley improves performance, bone mineralization, and phosphorus retention in turkey poults. *J. Appl. Poultry Res.* 10, 178-185.
- Lind, A.M., Elsgaard, L., Hansen, B. & Vinther, F.P. (1996). Miljøeffekter af vandstandshævning på lavbundsarealer. *Vand og Jord* 3, 256-259.
- Litske Petersen, J. (2003). Personlig meddelelse.
- Lott, J.N.A., Ockenden, I., Raboy, V. & Batten, G.D. (2002). A global estimate of phytic acid and phosphorus in crop grains, seeds, and fruits. In: Reddy, N.R. & Sathe, S.K. (eds.): *Food Phytates*, CRC Press, Boca Raton, Flo, 7-24.
- Lucca, P., Hurrell, R. & Potrykus, I. (2001). Genetic engineering approaches to improve the bioavailability and the level of iron in the rice grains. *Theor. Appl. Genet.* 102, 392-397.
- Magette, W.L., Brinfield, R.B., Palmer, R.E., Wood, J.D., Dillaha, T.A. & Reneau, R.B. (1987). Vegetated filter strips for agricultural runoff treatment. CBP/TRS2/87, US EPA, Philadelphia, USA, pp. 125.
- Magid, J., Jensen, M.B., Mueller, T. & Hansen, H.C.B. (1999). Phosphate leaching responses from unperturbed, anaerobic, or cattle manured mesotrophic sandy loam soils. *J. Environ. Qual.* 28, 1796-1803.
- Maguire, R.O., Sims, J.T., Dentel, S.K., Coale, F.J. & Mah, J.T. (2001). Relationships between bio-solids treatment process and soil phosphorus availability. *J. Environ. Qual.* 30, 1023-1033.
- Mejeriforeningen (upubliceret). Mineralindhold i silotankmælk fra 10 zoner 1995 til 1997.

- Miljøministeriet (2002). Bekendtgørelse nr. 604 af 15. juli om erhvervsmæssigt dyrehold, husdyrgødning, ensilage mv.
- Miljøministeriet (2003). Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (Slambekendtgørelsen).
- Miljøstyrelsen (1999). Teknisk anvisning for Punktkilder, Version 2.
- Miljøstyrelsen (2002). Punktkilder 2001. Orientering fra Miljøstyrelsen Nr. 7.
- Morse, D., Head, H.H. & Wilcox, C.J. (1992). Disappearance of phosphorus in phytate form concentrates in vitro and from rations fed to lactating cows. *J. Dairy Sci.* 75, 1979.
- Munkholm, L.J. & Sibbesen, E. (1997). Tab af fosfor fra landbrugsjord. *Miljøforskning* no. 30. Det Strategiske Miljøforskningsprogram, 63 sider.
- Møller, J., Thøgersen, R., Kjeldsen, A.M., Weisbjerg, M., Søegaard, K., Hvelplund, T. & Børsting, C.F. (2000). Fodermiddeltabel, sammensætning og foderværdi af fodermidler til kvæg. Rapport nr. 91, Landbrugets Rådgivningscenter, Landskontoret for Kvæg, s. 52.
- Nelson, A.B., Daniels, L.B., Hall, J.R. & Shields, L.G. (1976). Hydrolysis of natural phytate phosphorus in the digestive tract of calves. *J. Anim. Sci.* 42, 1509-1512.
- Nielsen, K., Andersen, H.E., Larsen, S.E., Kronvang, B., Stjernholm, M., Styczen, M., Poulsen, R.N., Villholth, K., Krogsgaard, J., Dahl-Madsen, K.I., Friis-Christensen, A., Uhrenholdt, T., Hansen, I.S., Pedersen, S.E., Jørgensen, O., Windolf, J., Jensen, M.H., Refsgaard, J.C., Hansen, J.R., Ernsten, V., Børgesen, C.D. & Wiggers, L. (2004). Odense Fjord. Scenarier for reduktion af næringsstoffer. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU 485, 246 s.
- Nielsen, K., Thorsen, M., Markager, S.S., Jensen, J.P., Søndergaard, M., Refsgaard, J.C., Styczen, M., Dahl-Madsen, K.I., Børgesen, C.D., Wiggers, L., Pedersen, S.E. & Madsen, H.B. (2003). Kvantificering af næringsstoffers transport fra kilde til recipient samt effekt i vandmiljøet. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU 455, 114 s. (elektronisk).
- Nielsen, N.O. (1995). Nedsat fosforindhold i slagtesvinefoder. Meddelelse nr. 299, Landsudvalget for Svin, Den rullende afprøvning, 7 s.
- Nielsen, P.V. & Hansen, A.C. (1993). Buffer zones and phosphorus supply to Danish surface waters. Statusrapport Hedeselskabet, Danmark.
- NRC (1971). Nutrient requirements of domestic animals. No. 3. Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Fourth Revised Edition. National Academy of Sciences, Washington D.C.
- NRC (1994). Nutrient Requirements of Poultry: Ninth Revised Edition, chapter 2. National Research Council. National Academy Press, USA, 19-34.
- NRC (2001). Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition, chapter 6. National Research Council. National Academy Press, USA, 105-161.
- Oehl, F., Oberson, A., Probst, M., Fliessbach, A., Roth, H.R. & Frossard, E. (2001a). Kinetics of microbial phosphorus uptake in cultivated soils. *Biol. Fert. Soils* 34, 31-41.

- Oehl, F., Oberson, A., Sinaj, S. & Frossard, E. (2001b). Organic phosphorus mineralization studies using isotopic dilution techniques. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 65, 780-787.
- Olesen, F. (1979). *Læplantning: dyrkningssikkerhed, klimaforbedring, landskabspleje*. København. Landhusholdningsselskabets Forlag.
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Jacobsen, B.H., Vesterdal, L., Jørgensen, A.M.K., Christensen, B.T., Abildtrup, J., Heidmann, T. & Rubæk, G. (2004). *Jordbrug og klimaændringer – samspil til vandmiljøplaner*. DJF rapport - Markbrug 109, 177 pp.
- Olesen, J.E., Schønning, P., Hansen, E.M., Melander, B., Felding, G., Sandal, E., Fomsgaard, I., Heckrath, G., Axelsen, J.A., Nielsen, V., Jacobsen, O.H., Petersen, S.O., Christensen, B.T., Jørgensen, L.J., Hansen, L.M. & Jørgensen, M.H. (2002). *Miljøeffekter af pløjefri dyrkning*. DJF rapport 65 - Markbrug.
- Parfitt, R.L. (1978). Anion adsorption by soils and soil materials. *Adv. Agron.* 30, 1-50.
- Park, W.Y., Matsui, T., Yano, F. & Yano, H. (2000). Heat treatment of rapeseed meal increases phytate flow into the duodenum of sheep. *Anim. Sci. Tech.* 88, 31-37.
- Pedersen, E.F. (1983). *Drænvandsundersøgelser 1971-81*. Beretning nr. S 1667. Statens Planteavlsvforsøg, 53 s.
- Pedersen, E.F. (1985). *Drænvandsundersøgelser på marsk og dyb tørvejord 1971-84*. Tidsskrift for Planteavl 89, 319-329.
- Pedersen, V.E. (1990). Slagtekyllingers behov for tilgængeligt fosfor. Meddelelse nr. 782, Statens Husdyrbrugsvforsøg, 4 s.
- Pehrson, B., Kossila, V., Hansen, J.T. & Hansen, N.E. (1975). Förslag til normer för makro- och mikromineraler till nötkreatur och svin. *Foderjournalen* 3-4, 55-106.
- Pen, J., Verwoerd, T.C., van Paridon, P.A., Beudeker, R.F., van den Elzen, P.J.M., Geerse, K., van der Klis, J.D. Versteegh, H.A.J., van Ooyen, A.J.J. & Hoekema, A. (1993). Phytase-containing transgenic seeds as a novel feed additive for improved phosphorus utilisation. *Bio/Tech* 11, 811-814.
- Penn, J.C. & Sims, J.T. (2002). Phosphorus forms in biosolids-amended soils and losses in runoff: effects of wastewater treatment process. *J. Environ. Qual.* 31, 1349-1361.
- Petersen, C.Å. (1996). *Oversigt over landsforsøgene (1995)*. Landsudvalget for Planteavl.
- Pionke, H.B., Gburek, W.J., Sharpley, A.N. & Zollweg, J.A. (1997). Hydrological and chemical controls on phosphorus loss from Catchments. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C. and Johnston, A.E. (Eds.): *Phosphorus loss from soil to water*. CAB Int. Press, Cambridge, UK, 225-242.
- Plantedirektoratet (1997). *Bekendtgørelse nr. 677 af 25. august om salmonellafri foderstoffer*.
- Planterdirektoratet (2002). *Vejledning og skemaer, mark og gødningsplan, gødningsregnskab, plantedække, harmoniregler, ændringer i ejer- og brugerforhold, 2002/03*. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, 99 s.

- Plantedirektoratet (2002). Økologiske jordbrugsbedrifter 2001. Plantedirektoratet, Lyngby. 13 s.
- Pointillart, A., Fontaine, N. & Thomasset, M. (1984). Phytate phosphorus utilization and intestinal phosphatases in pigs fed low phosphorus: Wheat or corn diets. *Nutrition Reports International* 29, 473-483.
- Pote, D.H., Daniel, T.C., Nichols, D.J., Sharpley, A.N., Moore, P.A., Miller, D.M. & Edwards, D.R. (1999). Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentration in runoff. *J. Environ. Qual.* 28, 170-175.
- Pote, D.H., Daniel, T.C., Sharpley, A.N., Moore, Jr.P.A., Edwards, D.R. & Nichols, D.J. (1996). Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 855-859.
- Poulsen, H.D. Upubliceret.
- Poulsen, H.D. (1993). Mineraler til søer. Betydningen af hovedeffekter og vekselvirkninger for produktionen og biokemiske egenskaber. Ph.D. afhandling. Institut for Husdyrbrug og Husdyrsundhed. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole.
- Poulsen, H.D. (1994). Reduceret fosfortildeling til slagtesvin. Effekt på produktion og fosforudnyttelse. *Forskningsrapport 28*, Statens Husdyrbrugsforsøg.
- Poulsen, H.D. (1995). Fordøjeligheden af fosfor i foderfosfater og kødbenmel bestemt efter regressionsmetoden. *Forskningsrapport 34*, Landbrugsministeriet, Statens Husdyrbrugsforsøg, 20 s.
- Poulsen, H.D. (1998). Fordøjeligheden af fosfor i foderfosfater. *Grøn Viden, Husdyrbrug* 30, Danmarks JordbrugsForskning, 4 s.
- Poulsen, H.D. (2002). Beregning af N og P i husdyrgødning fra 1985 til 2000. *Notat*, 4 s.
- Poulsen, H.D. & Børsting, C.F. (2002). Genberegning af P-udskillelsen af dyr. *Internt Notat. Afd. for Husdyrernæring og Fysiologi, Danmarks JordbrugsForskning. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri.*
- Poulsen, H.D. & Carlson, D. (2004). Fytat nedbrydes i vådfoder. *Grøn Viden - Husdyrbrug* 40, 8 s.
- Poulsen, H.D. & Johansen, K. (2004). Reduceret fosforudskillelse ved anvendelse af fytasetilsætning til svinefoder. *Miljøprojektrapport 928*. Miljøministeriet, Miljøstyrelsen.  
<http://www.mst.dk/default.asp?Sub=http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2004>
- Poulsen, H.D. & Kristensen, V.F. (1997). Normtal for husdyrgødning. En revurdering af danske normtal for husdyrgødningsindhold af kvælstof, fosfor og kalium. *Beretning nr 736* fra Danmarks JordbrugsForskning, 165 s.
- Poulsen, H.D., Børsting, C.F., Rom, H.B. & Sommer, S.G. (2001). Kvælstof, fosfor og kalium i husdyrgødning - normtal 2000. *DJF-rapport nr. 36*, Husdyrbrug, Danmarks JordbrugsForskning, 152 s.
- Poulsen, H.D., Johansen, K.S., Hatzack, F., Boisen, S. & Rasmussen, S. (2001b). Nutritional value of low-phytate barley evaluated in rats. *Acta Agric. Scand. Sect. A Animal Sci.* 51, 53-58.



- Raboy, V., Young, K.V., Larson, S.R. & Cook, A. (2002). Genetics of phytic acid synthesis and accumulation. In: Reddy, N.R. & Sathe, S.K. (eds.): Food Phytates, CRC Press, Boca Raton, Flo., 63-84.
- Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J., Nilsson, B., Rasmussen, P., Kronvang, B., Skriver, J., Jensen, J.P., Dalsgaard, T., Søndergaard, M. & Hoffmann, C.C. (2002). Vidensstatus for sammenhængen mellem tilstanden i grundvand og overfladevand. Miljøstyrelsen. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen 21 (elektronisk), 110 s. [www.mst.dk/udgiv/publikationer/2002/87-7972-157-5/html](http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2002/87-7972-157-5/html)
- Renard, K.G., Foster, G.R., Yoder, D.C. & McCool, D.K. (1994). RUSLE revisited. Status, questions, answers, and the future. *J. Soil Water Conserv.* 49:3, 213-220.
- Richardson, A.E., Hadobas, P.A. & Hayes, J.E. (2001). Extracellular secretion of *Aspergillus* phytase from *Arbidopsis* roots enables plants to obtain phosphorus from phytase. *Plant. J.* 25, 641-649.
- Robinson, M. & Rycroft, D.W. (1999). The impact of drainage on streamflow. In: Skaggs, R.W. & van Schilfgaarde, J. (eds.): *Agricultural Drainage*. Vol 38. ASA, CSSA, SSSA, Madison, 767-800.
- Rubæk, G.H. (1999). Soil phosphorus dynamics. Effects of land use, fertilisation and liming. Ph.D. Thesis. Danish Institute of Agricultural Sciences, Foulum and The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen.
- Rubæk, G.H., de Jonge, L.W., Heckrath, G. & Schelde, K. (2002). Phosphorus leaching from undisturbed soil columns amended with cattle, pig or mink manure. In: de Jonge, L.W., Moldrup, P. & Jacobsen, O.H. (eds.): *Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils and sediments*. DIAS report, Plant production no. 80, 227-236.
- Rubæk, G.H., Djurhuus, J., Heckrath, G., Olesen, S.E. & Østergaard, H.S. (2000). Er danske jorde mættede med fosfor? I: Jacobsen, O.H. & Kronvang, B. (red.): *Tab af fosfor fra landbrugsjord til vandmiljøet*. DJF rapport 34, 17-30.
- Rubæk, G.H., Djurhuus, J., Heckrath, G., Olesen, S.E. & Østergaard, H.S. (2001). Fosfor i dansk landbrugsjord. *Grøn Viden, markbrug* 241, september 2001. Danmarks JordbrugsForskning.
- Rubæk, G.H., Guggenberger, G., Zech, W. & Christensen, B.T. (1999). Organic phosphorus in soil size-separates characterized by phosphorus 31P NMR and resin extraction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1123-1132.
- Rubæk, G.H., Sinaj, S, Frossard, E. Sibbesen, E. & Borggaard, O.K. (1998). Long-term effects of liming and P fertilisation on P state and P exchange kinetics in an acid, sandy soil. *World Congress of Soil Science, Montpellier, France 20-26 August 1998*, 7 p.
- Rodehutsord, M., Faust, M. & Lorenz, H. (1996). Digestibility of phosphorus contained in soybean meal, barley, and different varieties of wheat, without and with supplemental phytase fed to pigs and additivity of digestibility in a wheat-soybean-meal diet. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 75, 40-48.
- Rüegg, K. & Østergaard, HS. (2002). Udvikling i fosforudledningen til vandmiljøet gennem de sidste 100 år. *Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret. Planteavlsorientering nr. 07-447*, 5 s.

- Rygnestad, H., Jensen, J.D. & Dalgaard, T. (2000). Målrettede eller generelle politiske virkemidler? Økonomiske analyser i geografisk perspektiv. Working Paper 17/00, 48 s. Fødevarerøkonomisk Institut, Frederiksberg. ISSN 1398-4896.
- Schwertmann, U. & Schieck, E. (1980). Das Verhalten von Phosphat in eisenoxidreichen Kalkgleyen der Münchener Schotterebene. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 143, 391-401.
- Scott, T.A., Kampen, R. & Silversides, F.G. (1999). The effect of phosphorus, phytase enzyme, and calcium on performance of layers fed wheat-based diets. *Can. J. Anim. Sci.* 80 183-190.
- Sehested, J. & Weisbjerg, M.R. (2001). Availability of dietary phosphorus in cattle. In: Book of abstracts no. 7, 52nd Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Budapest, Hungary, 26-29 August 2001, 121.
- Sharpley, A.N. & Rekolainen, S. (1997). Phosphorus in agriculture and its environmental implications. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C. & Johnston, A.E. (eds.): Phosphorus loss from soil to water. CAB Int. Press, Cambridge, UK, 1-54.
- Sharpley, A.N. & Smith, S.J. (1994). Wheat tillage and water quality in the southern plains. *Soil Tillage Res.* 30, 33-38.
- Sibbesen, E. (1990). Kvælstof, fosfor og kalium i foder, animalsk produktion og husdyrgødning i dansk landbrug i 1980-erne. Tidsskrift for Planteavl's Specialserie. Beretning S 2054.
- Sibbesen, E. (1995). Phosphorus, nitrogen and carbon in particle-size fractions of soils and sediments. In: Schjønning, P., Sibbesen, E., Hansen, A.C., Hasholt, B., Heidmann, T., Madsen, M.B. & Nielsen, J.D. (eds.): Surface runoff, erosion and loss of phosphorus at two agricultural soils in Denmark. SP-report No. 14, Danish Institute of Plant and Soil Science, 135-148.
- Simmelsgård, S.E. (1996). Plantenæringsstoffer i drænvand og jordvand. SP rapport 7. Statens Planteavlsforsøg, 77 s.
- Sims, J.T., Simard, R.R. & Joern, B.C. (1998). Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.* 27, 277-293.
- Spencer, J.D., Alee, G.L. & Sauber, T.E. (2000). Phosphorus bioavailability and digestibility of normal and genetically modified low-phytate corn for pigs. *J. Anim. Sci.* 78, 675-681.
- Stamm, C.H. (2003). Water flow at the field scale. In: Chardon, W.J. and Schoumans, O.F. (eds.): Phosphorus Losses from Agricultural Soils - Processes at the Field Scale. COST Action 832 ALTERRA, Wageningen, The Netherlands, 21-35.
- Stephenson, R.E. & Chapman, H.D. (1931). Phosphate penetration in field soils. *J. Amer. Soc. Agron.* 31, 759-770.
- Strudsholm, F., Aaes, O., Madsen, J., Kristensen, V.F., Andersen, H.R., Hvelplund, T. & Østergaard, S. (1999). Danske fodernormer til kvæg. Rapport nr. 84, Landbrugets Rådgivningscenter, Landskontoret for Kvæg, 47 s.

- Sugiura, S.H., Raboy, V., Young, K.A., Dong, F.M. & Hardy, R.W. (1999). Availability of phosphorus and trace elements in low-phytate varieties of barley and corn for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 170, 285-286.
- Svendsen, L.M. & Kronvang, B. (1995). Dynamics of phosphorus compounds in a lowland river system: Importance of retention and non-point sources. *Hydrol. Process.* 9, 119-142.
- Syversen, N. (1994). Effect of vegetative buffer zones in minimizing agricultural runoff. *VANN* 2/96, 320-327.
- Syversen, N. (1996). Vegetasjonssoners effekt på avrenning fra jordbruksarealer – årsrapport 1995, ISBN 82-7467-186-4 Jordforsk rapport: 33/96, 10 p.
- Syversen, N. (1997). Buffer zones as measures for reducing surface runoff from areas with cereals. *Jordforsk Report 30/97*. Jordforsk, Aas, Norway.
- Szilas, C.P., Borggaard, O.K. & Hansen, H.C.B. (1998). Potential iron and phosphate mobilization during flooding of soil material. *Water Air Soil Pollut.* 106, 97-109.
- Sørensen, F. (2003). Personlig meddelelse.
- Sørensen, G. (2002). Ekstra calcium og fosfor i foder til polte fra 7 kg til 30 kg. Meddelelse nr. 546, Landsudvalget for Svin, Den rullende afprøvning, 11 s.
- Sørensen, G. & Poulsen, H.D. (1997). Reduceret fosforindhold til søer. Meddelelse nr. 361, Landsudvalget for Svin, Den rullende afprøvning, 10 s.
- Sørensen, G. & Poulsen, H.D. (2002). Reduceret fosfornorm til drægtige søer. Meddelelse nr. 542, Landsudvalget for Svin, Den rullende afprøvning, 12 s.
- Tauson, A.-H., Olafsson, B.L., Elnif, J., Treuhardt, J. & Ahlstrøm, Ø. (1992). Minkens och rävens mineralförsörjning. *NJF-Utredning/Rapport nr. 79*. Jordbrugsforlaget, 104 s.
- Thyssen, N., Erlandsen, M., Kronvang, B. & Svendsen, L.M. (1990). Stream models - biological structure and functioning (in Danish). *NPo-Research C10*. National Agency of Environmental Protection, Copenhagen, 104 pp.
- Turtola, E. & Paajanen, A. (1995). Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. *Agric. Wat. Manag.* 28, 295-310.
- Ulen, B. (1988). Phosphorus erosion under ley cropping and a grass protective zone. *Ekohydrologi* 26, 23-28.
- Ulen, B. & Mattsson, L. (2003). Transport of phosphorus forms and of nitrate through a clay soil under grass and cereal production. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 65, 129-140.
- Uusi-Kämppä, J. & Ylärinta (1992). Reduction of sediment, phosphorus and nitrogen transport on vegetated buffer strips. *Agric. Sci. Finl.* 1, 569-575.
- Uusi-Kämppä, J. & Ylärinta. (1996). Effect of buffer strips on controlling soil erosion and nutrient losses in southern Finland. In: Mulamootil, G., Warner, B.G. & McBean, E.A. (eds.): *Wetlands. Environmental gradients, boundaries and buffers*. CRC, Lewis Publ., New York.

- Vagstad, N., Stålnacke, P., Andersen, H.E., Deelstra, J., Gustafson, A., Ital, A., Jansons, V., Kyllmar, K., Loigu, E., Rekolainen, S., Tumas, T. & Vuorenmaa, J. (2001). Nutrient losses from agriculture in the Nordic and Baltic countries. Nordic Council of Ministers, Environment/Agriculture and Forestry, TemaNord 2001, 591.
- Valk, H. & Sebek, L.B.J. (1999). Influence of long-term feeding of limited amounts of phosphorus on dry matter intake, milk production, and body weight of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82, 2157-2163.
- Valpasvuo-Jaatinen, P. (2003). Personlig meddelelse.
- van der Klis, J.D. & Versteegh, H.A.J. (1999). Phosphorus nutrition of poultry. Recent developments in poultry 2, 309-320.
- van der Zee, S.E.A.T.M., van Riemsdijk, W.H. & de Haan, F.A.M. (1990a). Het protocol fosfaatverzadigde gronden, Deel 1. Wageningen, Landbouwniveriteit, Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding.
- van der Zee, S.E.A.T.M., van Riemsdijk, W.H. & de Haan, F.A.M. (1990b). Het protocol fosfaatverzadigde gronden, Deel 2. Wageningen, Landbouwniveriteit, Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding.
- Veum, T.L., Ledoux, D.R., Bollinger, D.W., Raboy, V. & Cook, A. (2002). Low-Phytic acid barley improves calcium and phosphorus utilization and growth performance in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 80, 2663-2670.
- Vought, L.B., Lacoursiere, J.O. & Voelz, N.J. (1991). Streams in the agricultural landscape. *Vatten* 47, 321-328.
- Waldroup, P.W. (1999). Nutritional approaches to reducing phosphorus excretion by poultry. *Poult. Sci.* 78, 683-691.
- Wiggers, L. (2001). Fosforgrænsen er nået. *Vand og Jord* 8, 99-101.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: USDA, Agricultural Handbook no. 537. Washington D.C. Superintendent of documents, U.S. Government Printing Office.
- Witt, K.E. & Owens, F.N. (1983). Phosphorus: ruminal availability and effects on digestion. *J. Anim. Sci.* 56, 930-937.
- Wu, Z. & Satter, L.D. (2000a). Milk production and reproductive performance of dairy cows fed two concentrations of phosphorus for two years. *J. Dairy Sci.* 83, 1052-1063.
- Wu, Z., Satter, L.D. & Sojo, R. (2000b). Milk production, reproductive performance, and fecal excretion of phosphorus by dairy cows fed three amounts of phosphorus. *J. Dairy Sci.* 83, 1028-1041.
- Wu, Z., Satter, L. D., Blohowiak, A. J., Stauffacher, R. H. & Wilson, J. H. (2001). Milk production, estimated phosphorus excretion, and bone characteristics of dairy cows fed different amounts of phosphorus for two or three years. *J. Dairy Sci.* 84, 1738-1748.

- Xiao, X.J., Anderson, D.W. & Bettany, J.R. (1991). The effect of pedogenetic processes on the distribution of phosphorus, calcium and magnesium in Gray Luvisols. *Can. J. Soil Sci.* 71, 397-410.
- Yao, J.J., Wei, L.S. & Steinberg, M.P. (1983). Effect of maturity on chemical composition and storage stability of soybeans. *J. Amer. Oil. Chem.* 60, 1245-1249.
- Yoder, D. & Lown, J. (1995). The future of RUSLE: Inside the new Revised Universal Soil Loss Equation. *J. Soil Water Conserv.* 50:5, 484-489.
- Young, R.A., Huntrods, T. & Anderson, W. (1980). Effectiveness of vegetated buffer strips in controlling pollution from feedlot runoff. *J. Environ. Qual.* 9, 483-487.
- Zhang, Z.B., Kornegay, E.T., Radcliffe, J.S., Denbow, D.M., Veit, H.P. & Larsen, C.T. (2000a). Comparison of genetically engineered microbial and plant phytases for young broilers. *Poul. Sci.* 79, 709-717.
- Zhang, Z.B., Kornegay, E.T., Radcliffe, J.S., Wilson, J.H. & Veit, H.P. (2000b). Comparison of genetically engineered *Aspergillus* and canola in weanling pig diets. *J. Anim. Sci.* 78, 2868-2878.
- Aaes, O. & Sehested, J. (2003). Reduktion af de danske normer for fosfor til kvæg. *KvægInfo* nr. 1134, 2 s.

## Resumé

Fosfor er et livsnødvendigt næringsstof for både dyr og planter. En tilstrækkelig fosforforsyning til husdyrene og afgrøderne spiller derfor både produktions- og sundhedsmæssigt en vigtig rolle. På den anden side er der stor opmærksomhed på, at overskydende fosfor fra landbruget har negativ betydning for især vandmiljøet. Målet med denne rapport er at beskrive fosforomsætningen hos husdyr og mulighederne for gennem fodringsmæssige tiltag at begrænse fosfortilførslen til landbrugsjorden. Ligeledes er det målet at beskrive fosforomsætningen i og -tabet fra landbrugsarealer og mulighederne for at begrænse fosfortabet til vandmiljøet.

### Markbrug



### Havebrug



### Husdyrbrug



Grøn Viden udkommer i en have-, mark- og husdyrbrugsserie.

Læs mere om publikationerne på vores hjemmeside [www.agrsci.dk](http://www.agrsci.dk)