



Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

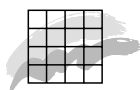
Fosfor i jord og vand

– udvikling, status og perspektiver

Faglig rapport fra DMU, nr. 380



[Tom side]



Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

Fosfor i jord og vand

– udvikling, status og perspektiver

Faglig rapport fra DMU, nr. 380
2001

Brian Kronvang (red.)

Hans L. Iversen

Jørgen Ole Jørgensen

Irene Paulsen

Afdeling for Vandløbsøkologi

Jens Peder Jensen

Afdeling for Sø- og Fjordøkologi

Daniel Conley

Afdeling for Havmiljø

Thomas Ellermann

Afdeling for Atmosfærisk Miljø

Karin D. Laursen

Miljøstyrelsen

Lisbeth Wiggers

Århus Amt

Lisbeth Flindt Jørgensen

Jens Stockmarr

Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse

Datablad

Titel:	Fosfor i jord og vand – udvikling, status og perspektiver	
Forfattere:	Brian Kronvang (red.) ¹ , Hans L. Iversen ¹ , Jørgen Ole Jørgensen ¹ , Irene Paulsen ¹ , Jens Peder Jensen ² , Daniel Conley ³ , Thomas Ellermann ⁴ , Karin D. Laursen ⁵ , Lisbeth Wiggers ⁶ , Lisbeth Flindt Jørgensen ⁷ , Jens Stockmarr ⁷	
Afdelinger:	¹ Afdeling for Vandløbsøkologi, ² Afdeling for Sø- og Fjordøkologi, ³ Afdeling for Havmiljø, ⁴ Afdeling for Atmosfærisk Miljø, ⁵ Miljøstyrelsen, ⁶ Århus Amt, ⁷ Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse	
Serietitel og nummer:	Faglig rapport fra DMU nr. 380	
Udgiver:	Danmarks Miljøundersøgelser ©, Miljøministeriet	
URL:	http://www.dmu.dk	
Udgivelsestidspunkt:	December 2001	
Faglig kommentering:	Jens M. Andersen, DMU; Jørgen Windolf, Fyns Amt; Lars M. Svendsen, DMU; Skov- og Naturstyrelsen	
Tegninger og layout: Omslagsfoto:	Grafisk Værksted, DMU, Silkeborg Anker Laubel, DMU	
Bedes citeret:	Kronvang, B (red.), Iversen, H.L., Jørgensen, J.O., Paulsen, I., Jensen, J.P., Conley, D., Ellermann, T., Laursen, K.D., Wiggers, L., Jørgensen, L.F. & Stockmarr, J. 2001: Fosfor i jord og vand – udvikling, status og perspektiver. Danmarks Miljøundersøgelser. 90 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 380. Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse.	
Sammenfatning:	Denne rapport er resultatet af bl.a. den landsdækkende overvågningsindsats i overfladevand, grundvand og landovervågningsoplande der begyndte i 1989 som en opfølgning af Vandmiljøplan I. Rapporten sætter fokus på tilstand og udvikling hvad angår fosforudledningen fra de enkelte sektorer, fosforindholdet i overfladevand og grundvand, samt den økologiske betydning af fosfor i vandløb, søer, fjorde og andre kystvande.	
Emneord:	Fosfor, landbrug, renseanlæg, dambrug, industri, ophobning i jord, økologi, vandløb, søer, fjorde, havet	
Finansiel støtte:	Ingen ekstern finansiering.	
ISBN:	87-7772-647-2	
ISSN (trykt):	0905-815X	
ISSN (elektronisk):	1600-0048	
Papirkvalitet:	Cyclus Print	
Tryk:	Silkeborg Bogtryk, EMAS registreret nr. DK-S-0084	
Sideantal:	90	
Oplag:	1000	
Pris:	kr. 100,- (inkl. 25 % moms, ekskl. forsendelse)	
Internet-version:	Rapporten kan også findes som PDF-fil på Danmarks Miljøundersøgelses hjemmeside http://faglige-rapporter.dmu.dk	
Købes i boghandelen eller hos:	Danmarks Miljøundersøgelser Vejløvej 25 Postboks 314 8600 Silkeborg Tel: 89 20 14 00 Fax: 89 20 14 14 e-mail: dmu@dmu.dk www.dmu.dk	Miljøbutikken Information & Bøger Læderstræde 1 1201 København K Tel: 33 95 40 00 Fax: 33 92 76 90 e-mail: butik@mem.dk www.mem.dk/butik

Indhold

Sammenfatning og konklusion 5

English summary and conclusion 11

1 Om temarapporten 17

2 Fosforforureningen overvåges i et landsdækkende program 19

3 Forekomst og effekt af fosfor i jord og vand 21

3.1 Fosfor er et naturligt forekommende stof

3.2 Fosfor er nødvendigt for afgrøden

3.3 Fosfor i overfladevand

3.4 Fosfor tabes på mange måder fra jorden til vandmiljøet

3.5 Fosfor kan give uønsket en stor og uønsket algevækst i vandløb, søer og fjorde

4 Natur- og kulturskabte forholds betydning for fosfor 27

4.1 De naturgivne forhold i Danmark

4.2 Menneskeskabte påvirkninger

4.3 Landbrugets udvikling

4.4 Udvikling i byernes spildevandsrensning

5 Indgreb mod udledninger af fosfor siden starten af 1970'erne 35

6 Punktkildernes betydning for fosforforureningen af overfladevand 37

6.1 Fosforudledninger fra punktkilder til vandmiljøet

6.2 Byernes renseanlæg

6.3 Særskilte industrielle udledninger

6.4 Dambrug

6.5 Regnvandsbetingede udledninger

6.6 Udledninger fra spredt bebyggelse i det åbne land

7 Landbrugets fosforhusholdning og tab af fosfor fra landbrugsjord 45

7.1 Fosforbalancer i dansk landbrug

7.2 Fosforstatus i landbrugsjord

7.3 Fosfortab fra landbrugsjord til vandmiljøet

8 Atmosfærisk deposition af fosfor 55

9 Kilderne til fosfor i overfladevand og Danmarks fosforbalance 57

9.1 Vandløb

9.2 Søer

9.3 Fjorde og kystvande

9.4 Udviklingen i Danmarks fosforbalance

10 Fosfor i grundvand og overfladevand 63

10.1 Grundvand

10.2 Kilder og kildebække

10.3 Vandløb

10.4 Søer

10.5 Fjorde

10.6 Åbne farvande

11 Målsætning og målsætningsopfyldelse i overfladevand 83

11.1 Vandløb

11.2 Søer

11.3 Fjorde

Referencer 87

Danmarks Miljøundersøgelser

Faglige rapporter fra DMU

[Tom side]

Sammenfatning og konklusion

Fosfor overvåges i vandmiljøet

I NOVA-2003 (Det Nationale Program for Overvågning af Vandmiljøet) sker der en løbende overvågning af fosforforureningen i atmosfære, grundvand, vandløb, søer, fjorde og havområder. De omfattende data herfra samt fra forskning og amternes miljøtilsyn er hovedgrundlaget for denne temarapport om fosfor fra Danmarks Miljøundersøgelser. Overvågningsdata giver mulighed for både at opgøre kilderne til fosfor, forureningen med fosfor i de forskellige vandområder og de økologiske effekter heraf. Overvågningsdata udgør oftest grundlaget for indsats hvis målsætningen for et vandområde ikke er opfyldt.

Fosfor får stadig større betydning for tilstanden i vandmiljøet

Danmark har næsten løst problemet med forurening af vandområder med organisk stof og næringssalte fra spildevand og er godt på vej med en reduktion af kvælstof fra markerne. Derimod er der ikke sket nogen reduktion i fosforudvaskningen fra de dyrkede arealer, som nu er den største kilde til forforbelastningen af vore vandområder. Det har i mange år været gængs viden at fosfor er det vigtigste begrænsende næringsstof for væksten af alger i de danske søer. I vandløb har fosfor derimod ikke særlig stor betydning for de økologiske forhold fordi der er en meget stor transport gennem systemerne. Fosfor er dog begrænsende for væksten af bundlevende alger i foråret.

I fjorde og kystvande har kvælstof oftest været begrænsende for algevæksten undtagen i korte perioder af foråret i nogle fjorde. Det har ændret sig i de sidste 10 år. Den store reduktion af fosforudledninger fra byer og industri har nu medført at fosfor er blevet mere begrænsende for algevækst i fjorde og kystvande. Dette kan blive modvirket hvis fosforudledningen fra andre kilder – herunder især landbruget – stiger i de kommende år.

Hvor kommer fosfor fra – kildernes betydning

Kilderne til fosforforureningen af det danske vandmiljø har ændret sig betydeligt siden 1989. Punktkilderne, dvs. byernes renseanlæg, industrier, dambrug og spredt bebyggelse, udgjorde i 1989 næsten 90 % af den samlede fosfortilførsel til havet. I 1999 var andelen reduceret til

ca. 40 %. I samme periode er betydningen af fosfortabet fra dyrkede arealer til ferskvand derfor også steget fra at udgøre omkring 20 % i slutningen af 1980'erne til omkring 50 % i slutningen af 1990'erne.

Fosfor og spildevand

Fosforudledningerne fra byernes renseanlæg til overfladevand udgjorde 4.470 tons i 1989 fordelt med 1.770 tons til ferskvand og 2.700 tons direkte til havet. Siden da er fosforudledningen reduceret til 581 tons i 1999, en reduktion på 87 %, som følge af udbygningen af byernes renseanlæg. De samlede fosforudledninger fra industrien til overfladevand er i samme periode reduceret med 94 % og fra ferskvandsdambrug med 65 %. Hertil kommer at udledningerne fra den spredte bebyggelse uden for kloakerede områder er blevet reduceret med mindst 26 % på grund af det øgede brug af fosfatfrit vaskepulver i husholdningerne. Samtidig foregår der nu en forstærket indsats for yderligere at reducere fosforudledningerne fra spredt bebyggelse i det åbne land.

	1989	1999
Udledninger fra renseanlæg	4.470 tons	581 tons
Særskilte industrielle udledninger	1.195 tons	69 tons
Udledninger fra ferskvandsdambrug	238 tons	83 tons
Udledninger fra havdambrug	60 tons	35 tons
Udledninger fra regnvandsbetingede udløb	– 200-300 tons –	
Udledninger fra spredt bebyggelse	300 tons	221 tons
Gennemsnitligt tab fra naturarealer	– 61 tons –	
Gennemsnitligt tab fra landbrugsarealer	– 1.300 tons –	

Udviklingen i de totale udledninger af fosfor til overfladevand fra punktkilder og gennemsnitligt tab fra regnvandsbetingede udløb, naturarealer og landbrugsarealer i perioden 1989 til 1999.

Fosfor og landbrug

Fosforudledningerne fra landbruget er ikke faldet siden 1989. Nye intensive målemetoder har afsløret at der er et større fosfortab fra dyrkede arealer i vandløbsoplande end der blev målt med traditionelle metoder for bare 10 år siden. Landbruget har reduceret forbruget af fosfor i handelsgødningen fra 47.600 tons i 1985 til 19.300 tons i 1999. I samme periode er produktionen af fosfor i husdyrgødning steget med 5.600 tons. Forskellen mellem tilførsel og fraførsel på landbrugsjorden er faldet fra et overskud på 15 kg fosfor pr. hektar dyrket areal i 1980 til 11 kg fosfor pr. hektar i 1999. Der sker således hvert år en nettotilførsel af fosfor til landbrugsjord og heraf tabes da omkring 0,5 kg fosfor pr. hektar tabes til overfladevand. Billedet er dog ikke ens over hele landet og for alle brugstyper. De store fosforoverskud er i husdyrbrugene, mens der ofte er underskud i de rene planteavlbrug.

Overskuddet af fosfor i dansk landbrug afspejler sig i jordens indhold af plantetilgængeligt fosfor. Fosfortallet er steget siden 1950'erne. Flertallet af de danske marker har i dag et højt fosfortal bedømt ud fra afgrødernes fosforbehov. Fra overvågningen og især udenlandske undersøgelser er der indikationer på at der nedvaskes mere fosfor fra sådanne marker, men sikre er vi ikke. Så her er en afgørende mangel i viden omkring fosfor problematikken. Fosforophobning og fosfortab fra landbrugsjord kan nemlig ikke håndteres som ved spildevandsanlæg med rensning og øjeblikkelig virkning. Fosfortilstanden i dyrkningsjorden ændres kun langsomt, så en ændret fosfortilførsel vil først efter en årrække påvirke fosfortabene til vandmiljøet.

Fosfor fra atmosfæren

Den årlige atmosfæriske deposition af fosfor på landjorden er ikke særlig stor (0,16 kg P ha⁻¹), specielt ikke når vi sammenligner med landbrugets overskud af fosfor pr. hektar landbrugsjord som er på ca. 10 kg i slutningen af 1990'erne. Over havet er depositionen af fosfor kun på 0,08 kg P ha⁻¹ idet hovedkilden til fosfor i atmosfæren er ophvirvling af støv fra marker mv. Selvom den atmosfæriske deposition af fosfor generelt er af meget lille betydning kan den lokalt være af betydning som kilde i enkelte søer.

Danmarks fosforbalance

Danmarks fosforbalance viser at der er et stort forbrug af fosfor i landbruget. Selvom landbruget har reduceret forbruget af fosfor markant siden midten af 1980'erne, er der behov for yderligere reduktioner hvis fosfortabet fra de dyrkede marker skal nedbringes. I forbindelse med dette er der behov for at kunne zonere Danmark i landområder eller oplande hvor fosfor udgør en særlig risiko for vandmiljøet. Dernæst skal de enkelte jordtyper kunne klassificeres set i forhold til bl.a. deres fosforindhold, dræningstilstand, hældning mv. for at kunne udtrykke deres potentiale for at tabe fosfor (opløst og partikelbundet). Dette emne er der et stort behov for at undersøge dybere – blandt andet fordi de regionale myndigheder skal bruge viden herom ved fastsættelse af målsætning og indgreb mod forureningskilderne.

Fosfor i grundvand

I drikkevand er der for fosfor en grænseværdi på 150 µg P l⁻¹. Grænseværdien overskrides sjældent og der er generelt ingen problemer med fosfor fra menneskeskabte kilder. Fosfor i grundvand stammer derimod fra naturlige aflejringer. Fosforindholdet er generelt lavest i det iltede, øvre grundvand og højest i det dybere reducerede grundvand.

Fosfor i vandløb

I skovvandløb og vandløb på hedearealer er fosforindholdet i gennemsnit på omkring $50 \mu\text{g P l}^{-1}$. I vandløb på dyrkede arealer er fosforindholdet i gennemsnit to en halv gange større, nemlig $128 \mu\text{g P l}^{-1}$. Forskellen mellem dyrkede arealer og naturarealer slår igennem både på opløst og partikelbundet fosfor. Når det drejer sig om tabet af fosfor er forskellen endnu mere udpræget. Der tabes således i gennemsnit $0,08 \text{ kg P ha}^{-1}$ fra naturoplande mod $0,51 \text{ kg P ha}^{-1}$ fra landbrugsopplande. Der er altså en meget stor forskel i fosfortab mellem naturarealer og landbrugsarealer. En forskel som må hænge sammen med forskelle i fosforpuljerne i jorden og forskelle i afstrømningsforhold, fx som følge af dræning.

Fosfor i søer

Fosfor er det næringsstof som i de fleste søer begrænser algevæksten. Reduktionen i fosforudledningen fra punktkilder har medført et fald i den gennemsnitlige koncentration af fosfor i 27 ferskvandssøer fra 207 til $134 \mu\text{g P l}^{-1}$ i perioden 1989-99. Faldet i fosforindholdet i søerne har resulteret i en lille forbedring i algemængden og derfor også sigtddybden på ca. 20 cm. Det er dog stadigvæk kun ca. 30 % af de danske søer som opfylder de fastsatte natur- og miljømålsætninger. Altså skal der ske en yderligere reduktion i fosfortilførslen til de fleste søer. Modelbaserede scenarier viser at der kun kan opnås en lille forbedring i sigtddybden ved at reducere fosforudledningen med spildevand med yderligere 75 %. En opfyldelse af målsætningerne vil kræve en stor reduktion af den diffuse fosfortilførsel fra det åbne land i søoplandene. Hvordan dette skal nås inden for overkommelig tid, er svært at se. I forbindelse med gennemførelse af indsatsplaner for søer vil det være nødvendigt at vide noget mere om hvor meget af fosforbelastningen som er på partikelbundet form, og om biotilgængeligheden i søen.

Fosfor i fjorde, kystvande og åbne farvande

Også i fjordene er den årlige gennemsnitskoncentration af fosfor faldet betydeligt, fra $68 \mu\text{g P l}^{-1}$ til $38 \mu\text{g P l}^{-1}$, i perioden 1989-99. Reduktionen af fosforkoncentrationen har i gennemsnit for de danske fjorde resulteret i en lavere algebiomasse. Det resultat giver sig også udslag i at fosfor på bekostning af kvælstof er blevet begrænsende for algebiomassen i større dele af året i mange fjorde og kystvande. I de mere åbne farvande er der ikke de store ændringer i fosforkoncentrationen fordi tilførslerne fra land her udgør et mindre bidrag. Her er kvælstof fortsat det mest begrænsende næringsstof for algeproduktionen.

Hvad mangler der af viden for at understøtte fremtidens indsatsplaner vedrørende fosfor

Danmark er på mange måder et foregangsland når det drejer sig om at nedbringe forureningen med næringsstoffer i vandområderne, både når det drejer sig om grundvand og overfladevand. Med de mange gennemførte reguleringer af de forurenende sektorer er der nået store fremskridt med nedbringelse af kvælstof- og fosforudledninger med spildevand. Her er målet om en 50 % reduktion i kvælstofudledningen og en 80 % reduktion i fosforudledningen generelt nået. Også fosforudledningen med spildevand fra spredt bebyggelse mindskes i disse år ved nedsivning eller rensning i de oplande, hvor der kommer en væsentlig forurening herfra. Hertil kommer at de mange tiltag mod kvælstofudvaskningen fra landbrugsarealer også er begyndt at virke.

Derimod mangler der en indsats mod fosfortabet fra landbrugsarealer – en indsats der først og fremmest skal ske ved selve kilden. Tilførslen af fosfor til de fleste marker i Danmark bør reduceres så meget at der ikke sker en ophobning af fosfor i jorden (tilførsel = fraførsel) og at fosforindholdet ikke holdes højere end nødvendigt for en optimeret vækst af afgrøderne. Det vil også være nødvendigt med en flerstrengt strategi afhængig af de enkelte markers evne til at holde på fosfor og om markerne ligger i oplande der tillæder fosfor til følsomme recipienter. En sådan strategi kræver mere viden om mulighederne for bedre fosforhusholdning i form af fosfor i husdyrfoder, om separering af fosfor fra gylle, og om hvilke fysiske og dyrkningsmæssige faktorer der påvirker tabet af fosfor fra marken. Der mangler også viden om hvordan fosfor transporteres fra mark til overfladevand, og hvilke mekanismer der indvirker herpå i over- og underjord samt i bufferzoner, en viden som kun kan indhentes via forskning. Det er alle vidensbehov som er nødvendige for at kunne lave en målrettet indsats mod fosforforurening.

English summary and conclusions

Phosphorus in the aquatic environment is regularly monitored

In Denmark, phosphorus pollution of the atmosphere, groundwater, watercourses, lakes, estuaries and marine waters is continually monitored under NOVA-2003, the Danish Aquatic Monitoring and Assessment Programme. The comprehensive data generated by the monitoring programme together with research findings and data from environmental supervision by the Counties comprise the main foundation for this National Environmental Research Institute report on phosphorus. The monitoring data enable determination of the sources of the phosphorus, the degree of phosphorus pollution in the various water bodies and the ecological effects thereof. The monitoring data usually serves as the basis for remedial measures in cases where the quality objective for a water body is not met.

The impact of phosphorus on the aquatic environment is gaining in significance

Denmark has nearly solved the problem of nutrient and organic matter pollution of the aquatic environment from wastewater and is well on the way to reducing nitrogen loading from farmland. In contrast, however, no reduction has been achieved in phosphorus leaching from cultivated land, which now comprises the greatest source of phosphorus loading of the Danish aquatic environment. For many years it has been commonly known that phosphorus is the main limiting nutrient for algal growth in Danish lakes. In watercourses, in contrast, phosphorus is of no great significance for ecological conditions because there is considerable transport through the systems. Phosphorus does limit the growth of benthic algae in the spring, however.

In estuaries and coastal waters, algal growth has usually been limited by nitrogen except during brief periods in the spring in some estuaries. This has changed over the past 10 years. As a result of the major reductions achieved in phosphorus discharges from urban areas and industry, phosphorus has now become increasingly limiting for algal growth in estuaries and coastal waters. This can be counteracted if phosphorus discharges from other sources – in particular from agriculture – increase in the coming years.

Where does phosphorus come from – the significance of the various sources

The sources of phosphorus pollution of the Danish aquatic environment have changed considerably since 1989. The point sources, i.e. urban wastewater treatment plants, industries, freshwater fish farms and sparsely built-up areas, accounted for almost 90% of total phosphorus input to the sea in 1989, whereas the figure had decreased to approx. 40% by 1999. During the same period phosphorus loss from cultivated areas to inland waters has increased from around 20% of the total at the end of the 1980s to around 50% at the end of the 1990s.

Phosphorus and wastewater

Phosphorus discharges to surface waters from urban wastewater treatment plants amounted to 4,470 tonnes in 1989. Of this, 1,770 tonnes were discharged to inland waters, while the remaining 2,700 tonnes were discharged directly to the sea. Since 1989, phosphorus discharges have been reduced significantly due to upgrading of the wastewater treatment plants and in 1999 amounted to 581 tonnes, corresponding to an 87% reduction. The total phosphorus discharges to surface waters from industry have been reduced by 94% during the same period, while those from freshwater fish farms have been reduced by 65%. In addition, discharges from sparsely built-up areas outside the sewerage catchments have been reduced by at least 26% due to increased household use of phosphate-free detergents. At the same time, efforts have been enhanced to further reduce phosphorus discharges from sparsely built-up areas in rural areas.

	1989	1999
Discharges from wastewater treatment plants	4,470 tonnes	581 tonnes
Separate industrial discharges	1,195 tonnes	69 tonnes
Discharges from freshwater fish farms	238 tonnes	83 tonnes
Discharges from marine fish farms	60 tonnes	35 tonnes
Discharges from stormwater outfalls	– 200-300 tonnes –	
Discharges from scattered dwellings	300 tonnes	221 tonnes
Average loss from uncultivated areas	– 61 tonnes –	
Average loss from agricultural areas	– 1.300 tonnes–	

Development in total phosphorus discharges to surface waters from point sources and average loss from uncultivated areas and agricultural areas over the period 1989-99.

Phosphorus and agriculture

Phosphorus discharges from agricultural sources have not decreased since 1989. New intensive monitoring methods have revealed that the phosphorus losses from the cultivated areas in watercourse catchments are greater than was measured using traditional methods as little as 10 years ago. Agricultural consumption of phosphorus in commercial fertilizer has been reduced from 47,600 tonnes in 1985 to 19,300 tonnes in 1999. During the same period, phosphorus production in livestock

manure increased by 5,600 tonnes. The input-output balance has fallen from a surplus of 15 kg P ha⁻¹ cultivated land in 1980 to ca. 10 kg P ha⁻¹ at the end of the 1990s. As an annual average of 0.5 kg P ha⁻¹ is lost to surface waters, net input of phosphorus to the soil thus takes place each year. The phosphorus surplus is mainly seen on the livestock farms, whereas there is often a deficit on pure crop farms.

The phosphorus surplus in Danish agriculture is reflected in the soil's content of plant-available phosphorus, the soil phosphorus content having increased since the 1950s. The majority of Danish fields currently have a high soil phosphorus content judged from the crops' phosphorus requirements. The monitoring data and especially foreign studies indicate that phosphorus leaching is greater from such fields, although this has not been documented for the various soil types. This represents a decisive deficit in our understanding of the phosphorus problem. Phosphorus accumulation and phosphorus loss from farmland cannot be dealt with in the same way as wastewater, where the treatment measures implemented have an immediate impact. The phosphorus content of arable land changes only very slowly and it therefore takes many years before a change in phosphorus input is reflected by a change in phosphorus loss to the aquatic environment.

Phosphorus from the atmosphere

The annual atmospheric deposition of phosphorus on land is not particularly great (0.16 kg P ha⁻¹), especially not in comparison with the agricultural phosphorus surplus on farmland, which was about 10 kg P ha⁻¹ at the end of the 1990s. Phosphorus deposition on the sea amounts to only 0.08 kg P ha⁻¹ since the main source of phosphorus in the atmosphere is dust whirled up from fields, etc. Even though atmospheric deposition of phosphorus is generally of minor significance, it can be of considerable significance locally in individual lakes.

Phosphorus balance for Denmark

From the phosphorus balance for Denmark as a whole it is apparent that considerable phosphorus is used in agriculture. Even though the agricultural sector has reduced consumption of phosphorus considerably since the mid 1980s, further reduction is needed if phosphorus loss from the cultivated fields is to be reduced. In this connection, Denmark needs to be zoned in regions or catchments where phosphorus poses a particular risk to the aquatic environment. In addition, the individual soil types could be classified in relation to such factors as their phosphorus content, drainage state, slope, etc. in order to be able to express their potential to lose phosphorus (soluble and particulate). There is a considerable need to investigate this topic further, among other reasons because the regional authorities need to use this knowledge when setting quality objectives for water bodies and when deciding what measures to take against sources of phosphorus pollution.

Phosphorus in groundwater

The limit level for phosphorus in drinking water is $150 \mu\text{g P l}^{-1}$. This is rarely exceeded, and anthropogenic phosphorus sources generally do not pose any problem. In contrast, the phosphorus in groundwater mainly derives from natural deposits. The phosphorus content is generally lowest in the oxic upper groundwater and highest in the deeper anoxic groundwater aquifers.

Phosphorus in streams

In streams draining uncultivated catchments (e.g. forest and heathlands) the phosphorus concentration averages around $50 \mu\text{g P l}^{-1}$. In watercourses in cultivated catchments the mean phosphorus content is two and a half times greater, namely $128 \mu\text{g P l}^{-1}$. The difference between cultivated catchments and uncultivated catchments is apparent with regard to both dissolved and particulate phosphorus. Considering annual average phosphorus loss, the difference is even more pronounced, the loss from uncultivated catchments averaging $0.08 \text{ kg P ha}^{-1}$ as compared with $0.51 \text{ kg P ha}^{-1}$ from cultivated catchments. This very great difference in phosphorus loss is probably due to differences in the soil phosphorus pools as well as to differences in runoff conditions, for example as a consequence of drainage and erosion.

Phosphorus in lakes

In most Danish lakes the limiting nutrient for algal growth is phosphorus. The reduction in phosphorus discharges from point sources has led to a decrease in the annual mean concentration of phosphorus in 27 inland lakes from 207 to $134 \mu\text{g P l}^{-1}$ over the period 1989-99. The downward trend in the phosphorus concentration in the lakes has resulted in a slight improvement in algal abundance and a 20 cm reduction in Secchi depth. Nevertheless, only approx. 30% of the Danish lakes meet their ecological and environmental quality objectives. The phosphorus content of the majority of the lakes thus needs to be reduced further. Model scenarios show that only a slight improvement in Secchi depth can be obtained by reducing phosphorus discharges in wastewater by a further 75%. If the quality objectives are to be met, phosphorus input from the countryside in the lake catchments will have to be reduced considerably. How this could be achieved within a practicable time frame is difficult to imagine. Implementation of catchment management plans necessitates a much greater understanding of how much of the phosphorus load is in particulate form, and about its bioavailability in the lake.

Phosphorus in estuaries, coastal waters and the open marine waters

The annual mean phosphorus concentration in the estuaries has also decreased considerably – from $68 \mu\text{g P l}^{-1}$ to $38 \mu\text{g P l}^{-1}$ over the period 1989-99. On average, the reduction in phosphorus concentration has resulted in lower algal biomass in the Danish estuaries. This is also reflected in the fact that phosphorus has replaced nitrogen as the limit-

ing nutrient for much of the year in many estuaries and coastal waters. In the more open marine waters the phosphorus concentration has remained largely unchanged because phosphorus inputs from land are of minor significance. Here nitrogen remains the main limiting nutrient for algal production.

What further information is needed to support future action to deal with the phosphorus problem?

In many ways, Denmark is a pioneer as regards reducing nutrient pollution of the aquatic environment, both with respect to groundwater and surface waters. With the many measures implemented to regulate the polluting sectors, considerable progress has been made on reducing wastewater discharges of nitrogen and phosphorus. The targets of a 50% reduction in nitrogen discharge and an 80% reduction in phosphorus discharge have generally been attained. Wastewater discharges of phosphorus from sparsely built-up areas has also been reduced during the same period by implementation of soakaways or treatment measures in those catchments where the level of such pollution is high. Moreover, many of the measures to curtail nitrogen leaching from farmland have also begun to take effect.

In contrast, efforts need to be enhanced to limit phosphorus loss from farmland – efforts that primarily need to be directed at the source itself. The input of phosphorus to most fields in Denmark should be reduced sufficiently to hinder accumulation of phosphorus in the soil (addition = removal) and to ensure that the soil phosphorus content is not maintained at a higher level that is necessary for optimal growth of the crops. Moreover, a multifaceted strategy will be necessary depending on the capacity of the individual fields to retain the phosphorus and on whether the fields are located in catchments that supply phosphorus to vulnerable recipients. Such a strategy necessitates greater knowledge about the possibilities for better phosphorus housekeeping through improved use of phosphorus in livestock fodder and about separation of phosphorus from manure slurry, as well as about which physical and cultivational factors affect phosphorus loss at the field level. Information is also lacking about how phosphorus is transported from fields to surface waters, as well as about the mechanisms that affect such transport in surface soil and in the subsoil, as well as in buffer zones. Such knowledge can only be obtained through research. Improved knowledge of all these aspects is necessary to facilitate concerted efforts to deal with phosphorus pollution of the aquatic environment.



Foto: Martin Søndergaard, DMU

1 Om temarapporten

Fosfor er et nødvendigt næringsstof for planter og dyr. Men et for højt indhold af fosfor kan have negativ indflydelse på natur- og miljøtilstanden i vandmiljøet. For meget fosfor forårsager en øget algevækst der påvirker naturtilstanden i negativ retning især i søer og fjorde.

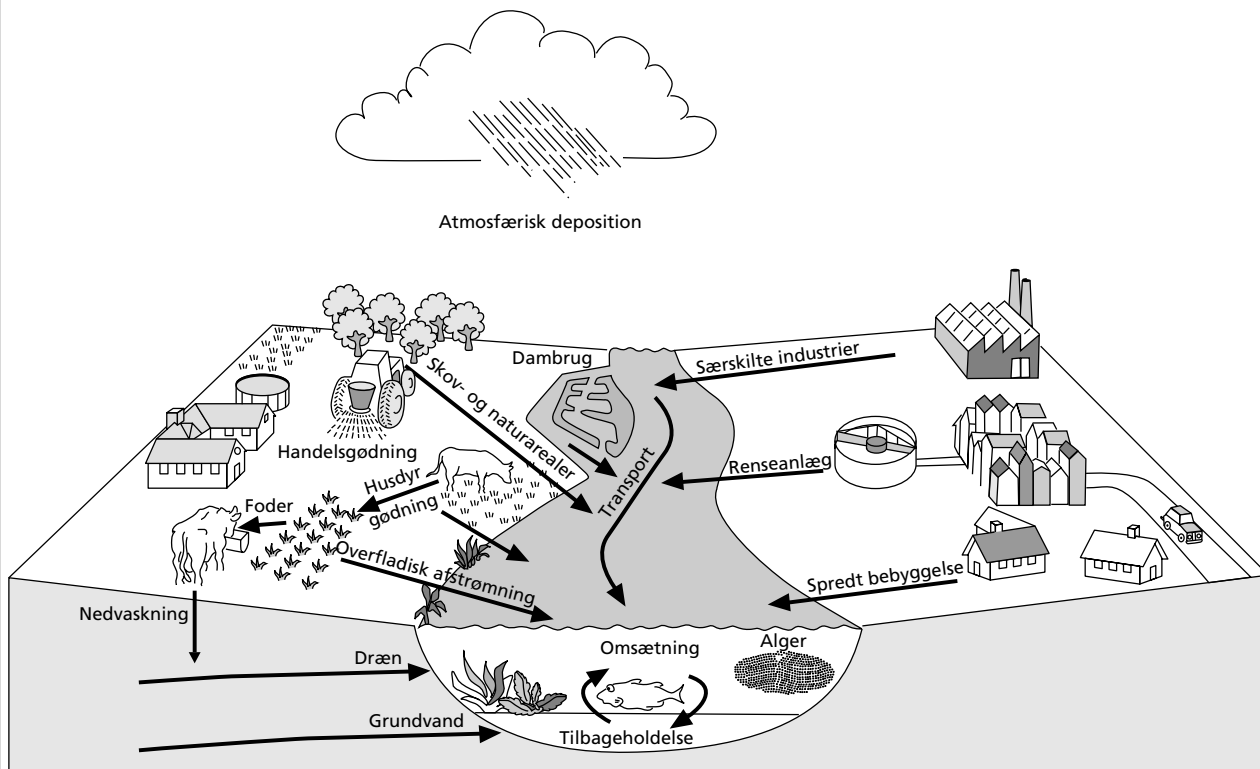
I 1987 blev den første Vandmiljøplan vedtaget med en målsætning om reduktion af fosfortabet til de ferske og marine vandområder med 80 %. Hvad angår fosfor var tiltagene i Vandmiljøplanen rettet mod udledningerne fra gårde (gårdbidrag) og fra punktkilder, det vil sige spildevand fra byer og industri. Med Dambrugsbekendtgørelsen fra 1989 blev fosforudledningerne fra dambrug også reguleret.

Samtidig med vedtagelsen af Vandmiljøplanen blev der igangsat en landsdækkende overvågning af fosforudledningerne fra de forskellige kilder og fosforindholdet i grundvand, vandløb, søer, fjorde og det åbne hav (NOVA).

Denne temarapport giver en status for hvordan forureningen med fosfor i jord og vand har udviklet sig i Danmark. Rapporten gennemgår hvor meget udledningerne af fosfor fra punktkilderne til de ferske og marine vande er reduceret. I rapporten gennemgås også udviklingen i landbrugets anvendelse af fosfor i handels- og husdyrgødning og ophobning i landbrugsjorden. Et fosforoverskud i landbrugsjorden kan resultere i tab til grundvand og overfladevand. På baggrund af målingerne i de særlige Landovervågningsoplande under NOVA programmet belyser vi hvor meget fosfor der tabes fra landbrugsjord til vandmiljøet.

Resultaterne af belastningerne af vandmiljøet med fosfor fra forskellige kilder opgør vi ved at dokumentere udvikling og tilstand med hensyn til fosforindholdet i vandløb, søer, fjorde og åbne hav. Vi ser på de økologiske effekter af fosfor i vandmiljøet og til slut beskriver vi i udvalgte eksempler hvad der skal til for at forbedre tilstanden i søer og fjorde.

Boks 1 Kilder til fosfor i vandmiljøet



Fosfor i vandmiljøet stammer fra det vi kalder punktkilder (spildevand) og diffuse kilder.

Punktkilder

Fosfor fra punktkilderne udledes som ordet siger normalt fra et veldefineret område til vandmiljøet, og spildevandet herfra kan normalt renses. Som punktkilder betragtes følgende:

- Byernes rensningsanlæg
- Industrielle udledninger
- Regnvandsbetingede udledninger
- Udledninger fra ferskvands- og havdambrug
- Udledninger fra spredt bebyggelse det være sig enkeltejendomme, sommerhuse mv. i det åbne land

Diffuse kilder

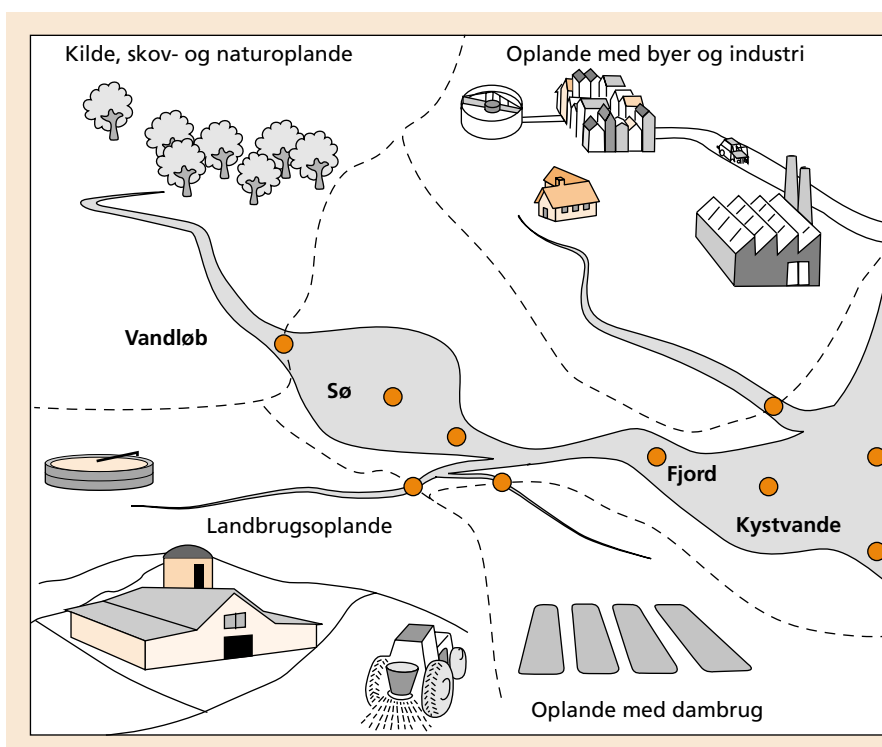
Med ordet 'diffuse kilder' menes fosforkilder som ikke udledes et bestemt sted eller hvor udledningen sker på mange måder. Til de diffuse kilder hører fosfortabet fra landbrugsarealer og fra udyrkede skov- og naturarealer. Overfor de diffuse kilder kan der normalt ikke iværksættes rensningstiltag, men fosfor kan tilbageholdes i fx bufferzoner langs vandløb og søer.

2 Fosforforureningen overvåges i et landsdækkende program

Brian Kronvang

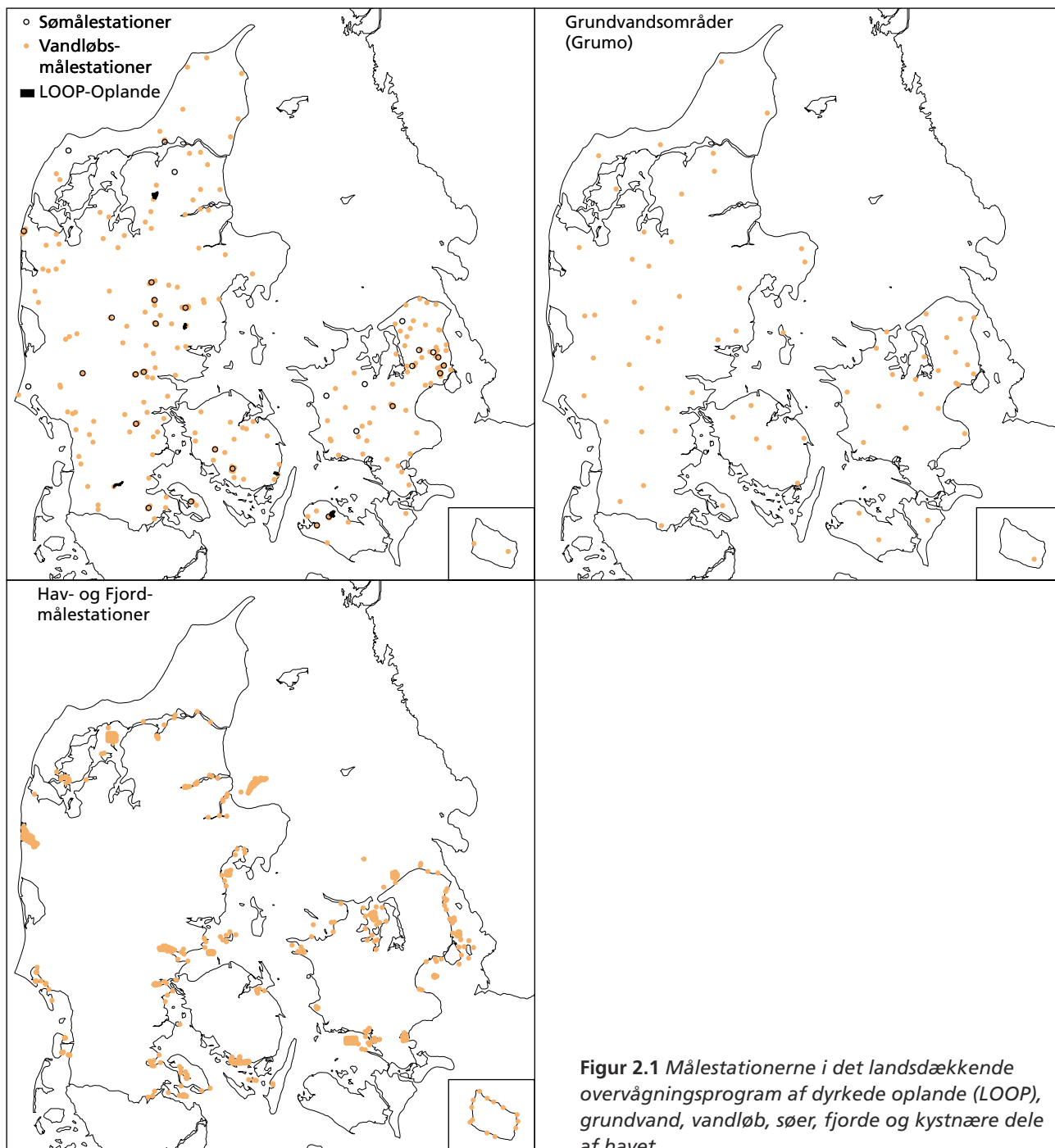
Siden 1988 er forureningen med bl.a. fosfor i det danske vandmiljø blevet overvåget i et landsdækkende program – NOVA. Det overordnede formål med det landsdækkende overvågningsprogram er at eftervise effekterne af de reguleringer og investeringer der er iværksat i forbindelse med vedtagelsen af Vandmiljøplanerne fra 1987 og 1998. Overvågningsprogrammet gennemføres i vid udstrækning af de danske amter ved en systematisk årlig indsamling af data fra vandmiljøet og de forurenende sektorer. Overvågningsprogrammet vil selvsagt også medvirke til at belyse effekterne af andre miljøtiltag, herunder opfyldelsen af målsætningerne i de amtslige planer for vandområderne. Det landsdækkende overvågningsprogram er et supplement til amternes miljøtilsyn der går helt tilbage til starten af 1970'erne.

Overvågningen omfatter målinger af fosforbelastningen fra forskellige kilder som renseanlæg, industrier og dambrug. Hertil kommer målinger af fosfor i jordvand, drænvand og grundvand under dyrkede arealer. Endelig sker der en omfattende overvågning af fosfor og de økologiske forhold ved en lang række målestationer i vandløb, søer, fjorde og åbne farvande (figur 2.1).



Boks 2 Overvågningsindsatsen i Danmark er stor

Overvågningen af forureningen med fosfor gennemføres indenfor forskellige geografiske niveauer rækende fra mindre oplande til hele landet. Overvågningen er helhedsorienteret ved at den omfatter både påvirkningen fra de forurenende sektorer, tilstanden og effekterne i vandmiljøet.



Figur 2.1 Målestationerne i det landsdækkende overvågningsprogram af dyrkede oplande (LOOP), grundvand, vandløb, søer, fjorde og kystnære dele af havet.

3 Forekomst og effekt af fosfor i jord og vand

Brian Kronvang
Jens P. Jensen
Daniel Conley

3.1 Fosfor er et naturligt forekommende stof

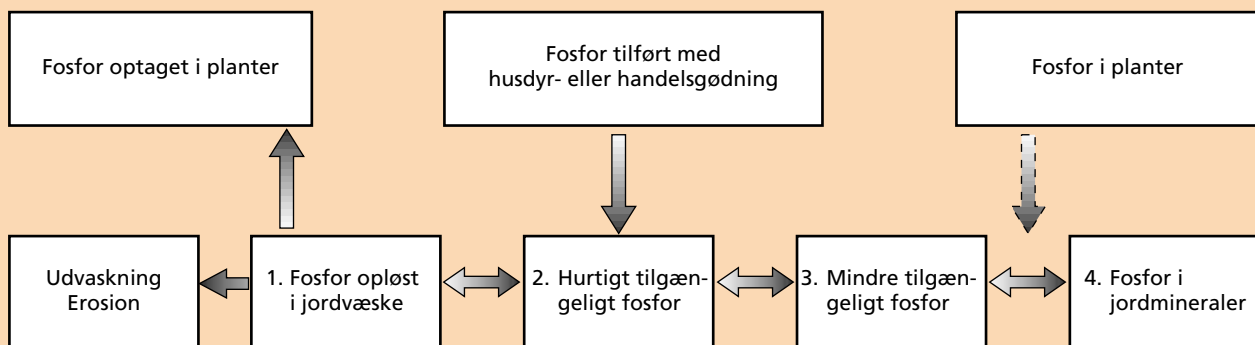
Fosfor (P) er et naturligt forekommende grundstof i jorden. Frit fosfor findes ikke i naturen idet fosfor reagerer meget villigt med andre stoffer. I naturen findes fosfor fortrinsvis som fosfater, i uorganisk form er orthofosfat (PO_4^{3-}) almindeligst. I jord findes fosfor bundet til organisk stof (organisk-P) mens en anden del er bundet til jordens mineraliske bestanddele (uorganisk-P). En meget lille del af fosforpuljen i jord findes opløst i jordvandet.

3.2 Fosfor er nødvendigt for afgrøden

Danske landbrugsjorde indeholder generelt en stor mængde fosfor. I pløjelaget er indholdet anslået til 1.000-2.000 kg P pr. hektar, hvilket svarer til 400-800 mg P pr. kg jord (Borggaard et al., 1991). Det naturlige fosforindhold er anslået til 100 mg P pr. kg i sandjord og 300-400 mg P pr. kg i lerjord (Borggaard et al., 1991). Fosfor indgår i en række kemi-

Boks 3 I jorden findes der mange forskellige fosforpuljer

Uorganisk fosfor er i jorden primært bundet til aluminium- og jernforbindelser samt kalcium. Derfor er uorganisk fosfor mest knyttet til ler- og siltpartikler i jorden. Sandjord har derfor en mindre evne til at binde fosfor end lerjord. Jordens organiske fosforpulje er bundet i humus, uomsatte planterester og mikroorganismer. Planterne optager fosfor som fosfationer fra jordvæsken. Da jordvæsken kun indeholder en lille mængde fosfor er planterne afhængige af at der løbende frigøres fosfat fra de organiske og uorganiske puljer i jorden. Alternativt skal der tilføres fosfor i form af handels- og husdyrgødning. En del af det ekstra tilførte fosfor vil ikke blive optaget af planterne. Det bliver enten nedvasket eller bundet til jordens organiske og uorganiske stof. Med tiden vil det ekstra tilførte fosfor blive mindre tilgængeligt for planterne.



Boks 4 Hvordan måles jordens plantetilgængelige fosforindhold

Fosfortilstanden i landbrugsjord svarer til jordens evne til at forsyne planterødder med opløst fosfor. Fosfortal bestemmes ved udtræk med 0,5 M NaHCO₃. En enhed i fosfortal svarer til 1 mg fosfor pr. 100 g jord. Det svarer til ca. 25 kg fosfor pr. hektar landbrugsareal. Kun når der er overskud af tilgængeligt fosfor i jorden kan man være sikker på at planterne får fosfor nok. Et fosfortal på 2-4 betragtes som et middelniveau mens et fosfortal på over 4 er højt (Knudsen, 2000).

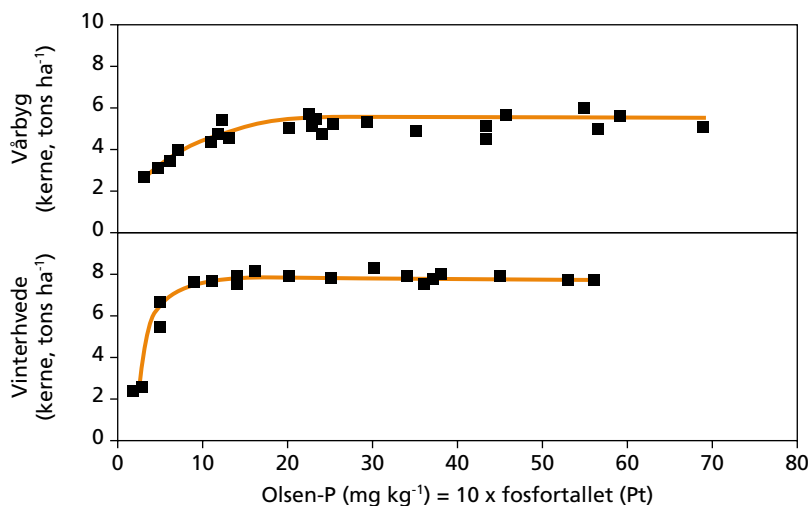
Fosfortal	Niveau	Anbefaling fra Landbrugets Rådgivningscenter
Under 1	Meget lavt	Tilførsel af større mængder fosfor fx i slam suppleret med årlig tilførsel af let tilgængeligt fosfor
1-2	Lavt	Tilførsel af 20-40 procent mere fosfor end bortførslen med afgrøder
2-4	Middel	Tilførsel af hvad der svarer til bortførsel med afgrøder
4-6	Højt	Tilførsel af 25-50 procent af bortførsel med afgrøder
Over 6	Meget højt	På kort sigt ikke behov for tilførsel af fosfor

ske forbindelser i planterne. Planternes vækst afhænger derfor af jordens evne til at forsyne planterne med fosfor. Dette kan udtrykkes ved jordens indhold af letopløseligt fosfor, også kaldet fosfortilstanden. I Danmark måles fosfortilstanden i landbrugsjord som fosfortallet (Pt) (Munkholm og Sibbesen, 1997).

Jordens evne til at binde og frigive fosfor afhænger af jordtypen. Ved en ny fosfortilførsel kan en svær lerjord således binde mere fosfor end en lerblandet sandjord, før den samme koncentration af opløst fosfor opnås i jordvæsken (Heckrath et al., 2000).

Mangel på plantetilgængeligt fosfor i jorden vil kunne påvirke udbyttet. I figur 3.1 er der vist et eksempel herpå for udbyttet af vårbyg og vinterhvede der falder kraftigt med dårligere fosfortilstand (lavt fosfortal).

Figur 3.1 Sammenhæng mellem jordens fosfortilstand målt som Olsen-P (10 x fosfortallet) og udbyttet af afgrøder på en engelsk mark (omtregnet fra Johnston og Poulton, 1997).

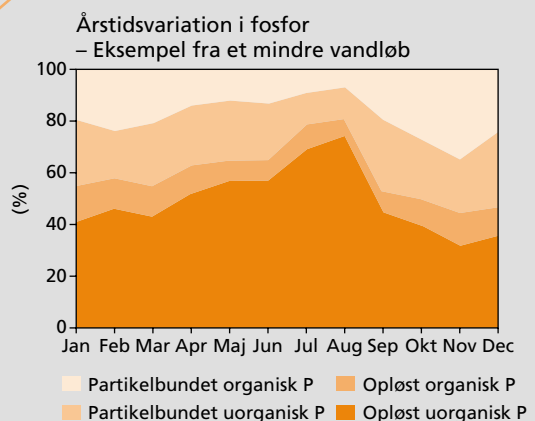
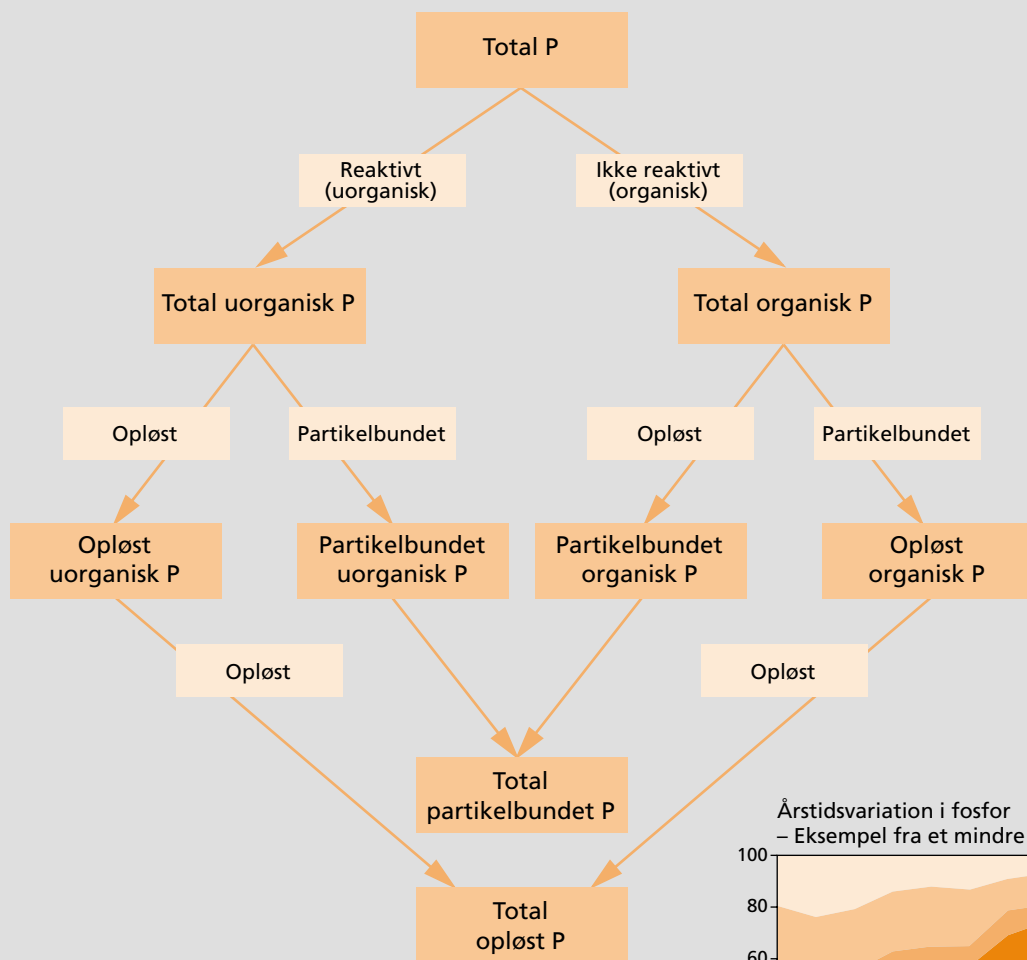


3.3 Fosfor i overfladevand

I overfladevand findes fosfor både i levende organismer, bundet til organiske og uorganiske jordpartikler samt på opløst form, hovedsageligt som uorganisk fosfor (boks 5). Forekomsten af de enkelte fraktioner af fosfor i vandmiljøet varierer over året og fra vandområde til vandområde afhængig af betydningen af de kilder der belaster vandområdet med fosfor.

Boks 5 Der findes fire fosforfraktioner i vand og indholdet varierer over året

I større vandløb hvor en stor del af fosfor leveres fra punktkilder som udledninger fra rensningsanlæg, vil opløst uorganisk-P være den dominerende fosforfraktion. Derimod vil fosforindholdet i mindre vandløb ofte være domineret af partikelbundet P. I mindre vandløb stammer hovedparten af fosfor fra diffuse kilder – hovedsageligt landbrugsarealer, spredt bebyggelse og skov- og naturarealer.



3.4 Fosfor tabes på mange måder fra jorden til vandmiljøet

Fosfor kan på mange måder blive transporteret fra land til vand. Vi kan overordnet tale om to transportmekanismer: Nedvaskning og erosion.

Boks 6 Transportveje for fosfor fra land til vand

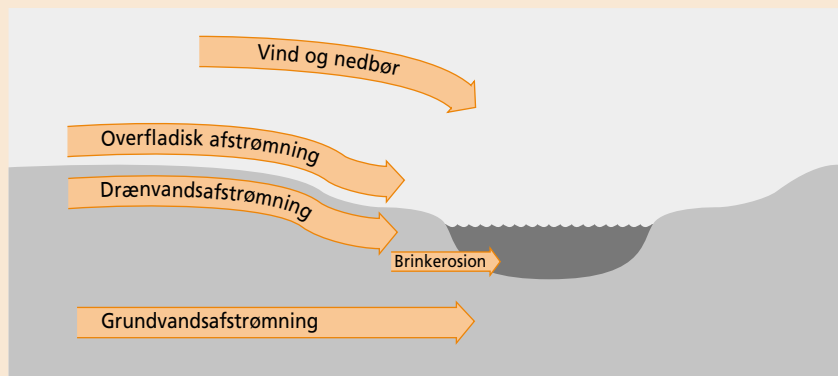


Foto: Bent Lauge Madsen, SNS

Fra jorden til vandmiljøet kan fosfor tabes ved nedvaskning af både opløst-P og partikelbundet-P fra topjorden til underjorden. Transporten sker ved at regnvand siver ned i jorden og tager opløst-P i jordvæsken med sig ned mod dybere jordlag. Her kan det opløste fosfor igen blive bundet til overfladen af ler- og siltpartikler eller blive transporteret videre til grundvandet. Fosfor bundet

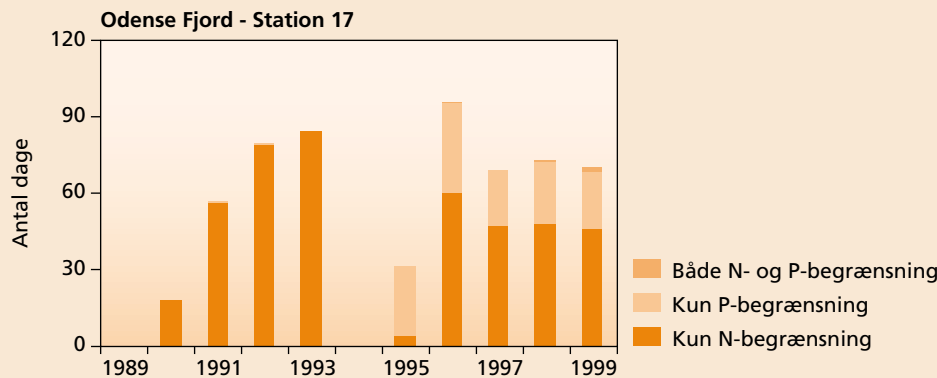
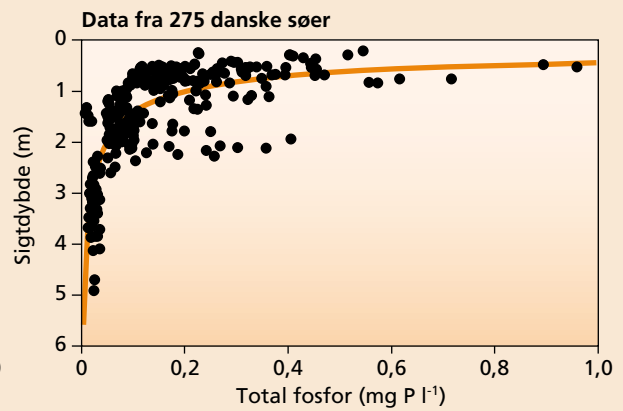
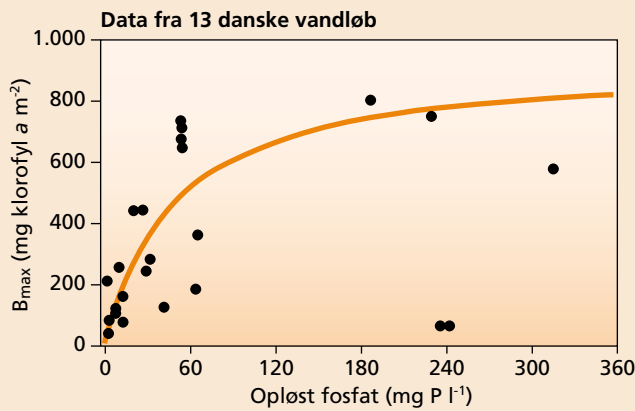
til jordpartikler kan også blive nedvasket fra topjorden igennem store porer eller sprækker i jorden. Det er hvad vi kalder makropore strømning. Hvis jorden er drænet ved hjælp af drænrør, som det er tilfældet på de mere lerede marker og lavbundsarealer, vil det nedvaskede opløste eller partikelbundne fosfor hurtigt kunne transporteres ud til vandløb. Det opløste fosfor der nedvaskes til grundvand vil eventuelt senere kunne nå frem til overfladvand alt afhængig af om fosfor i de dybere jordlag kan bindes til jorden. Visse aflejringer i jorden indeholder en del naturligt fosfor så naturligt fosfor kan også tilføres overfladevand med grundvand under de rette forhold.

Fosfor kan også transporteres fra marken til vandmiljøet ved erosion af jorden. Regnvandets kraft kan, når det rammer jorden, flytte jordpartikler og hvis jorden i forvejen er vandmættet eller den er frosset vil regn- og smeltvand transportere opløst-P og fosfor bundet til jordpartikler med sig. En del af dette fosfor vil nå frem til overfladevand hvis jorden støder op til og hælder ned mod en grøft, et vandløb eller en sø. En anden måde fosfor kan transporteres til overfladevand er ved erosion af brinkerne langs grøfter og vandløb, samt ved vinderosion på markerne.



Foto: Anker Laubel, DMU

Boks 7 Økologisk betydning af fosfor i vandløb, søer og fjorde



Vandløb

I vandløb er især væksten af småalgerne der vokser på bunden (mikrobentiske alger) begrænset af fosforindholdet i vandet (Kjeldsen, 1998). Det gælder specielt i forårsperioden hvor de bundlevende alger når deres maksimale omfang i vandløb. Store mængder af bundlevende alger kan i særlige tilfælde medføre uønskede døgnvariationer i koncentrationen af opløst ilt i vandløbsvandet som negativt kan påvirke dyrelivet.

Søer

Fosfor er begrænsende for algevæksten i de fleste danske søer. I de fleste lavvandede og dybe søer er fosfor begrænsende for væksten af de fritsvævende alger i søvandet (plankton alger). En øget mængde alger gør søvandet mere uklart (mindre sigt dybde). Man kan altså ikke se så langt ned mod søbunden i en fosforforurennet sø som i en ren sø. Det uklare vand forhindrer væksten af højere planter på søbunden – undervandsplanterne forsvinder. Det er sket i de fleste danske søer. Søen er kommet ud af sin naturlige balance og blevet fattigere på dyre- og planteliv. En stor fosforbelastning og algevækst øger også risikoen for uønsket forekomst af giftige blågrøn alger, iltsvind og i værste fald fiskedød i sommerperioden.

Fjorde

Fosfor er også begrænsende for algevæksten i fjorde og bugter i dele af året. Fosfor har tidligere især været begrænsende for algevækst i forårsperioden. Men i takt med byernes forbedrede rensning af spildevandet for fosfor er der sket en ændring hen mod at fosfor i stadig større dele af året er blevet begrænsende for algevækst.

3.5 Fosfor kan give en stor og uønsket algevækst i vandløb, søer og fjorde

I overfladevand vil en forøget tilførsel af fosfor i forhold til den naturbetingede forårsage en øget planteproduktion. Det gælder især for algerne der ofte er begrænset af forekomsten af fosfor. En forøget algevækst kan medføre forstyrrelser i økosystemet – forstyrrelser som er mest synlige i de stillestående vande (søer og fjorde). De strømmende vande, vandløb, har et hurtigt vandskifte og kan derfor både dæmpe effekterne af og borttransportere en eventuel uønsket stor algeproduktion.