

Biotilgjengelighet av fosfor fra jordbruksavrenning – kunnskapsstatus

Av Anne Falk Øgaard, Tore Krogstad, Eva Skarbøvik og Marianne Bechmann

Anne Falk Øgaard, Eva Skarbøvik og Marianne Bechmann er forskere ved Bioforsk Jord og miljø. Tore Krogstad er professor ved Institutt for plante- og miljøvitenskap, Universitetet for miljø- og biovitenskap.

Summary

Bioavailability of phosphorus from agricultural runoff – state of the art.

Phosphorus in agricultural runoff consists of many different fractions with different bioavailability. With the implementation of the EU Water Framework Directive it has become increasingly important to gain more insight in this topic, in order to target the mitigation measures towards the phosphorus sources that have the highest contribution to algal growth. Hence, this paper discusses the state of the art of the bioavailability of phosphorus from soil, with focus on the fractions dissolved reactive phosphorus, particle bound inorganic phosphorus, and organic phosphorus.

The review has shown that there are no clear answers regarding bioavailability of phosphorus from agricultural fields.

The bioavailability depends, amongst others, on soil type and former level of phosphorus fertilization. Complicated processes in the recipient determine to which extent phosphorus from diffuse runoff contributes to algal growth, which further means that measurements of different phosphorus fractions in effluents and streams not necessarily reflects the bioavailability of the phosphorus in the downstream lake.

Sammendrag

Fosfor i avrenning fra jordbruk består av mange ulike fraksjoner som har forskjellig biotilgjengelighet. En stor andel av fosforet er partikkelbundet, og det er derfor stor usikkerhet angående biotilgjengelighet av fosfor i jordbruksavrenning. Mer kunnskap om dette er nød-

vendig for arbeidet med Vannforskriften, fordi det er viktig å målrette tiltak mot de fosforkildene som bidrar mest til algevekst. I denne artikkelen oppsummeres kunnskap om biotilgjengelighet av fosfor fra jord, med fokus på fraksjonene løst reaktivt fosfor, partikkelbundet uorganisk fosfor og organisk fosfor. Biotilgjengeligheten avhenger av fordelingen av fosforet på de ulike fraksjonene, og dette er igjen avhengig av blant annet jordtype og tidligere oppgjødsling med fosfor. Kompliserte prosesser i resipienten styrer i hvilken grad fosfor fra diffus avrenning bidrar til algevekst, noe som betyr at målinger av ulike fosforfraksjoner i avløp eller bekker ikke nødvendigvis sier noe om hvor biotilgjengelig fosforet er når det kommer ut i en innsjø.

Innledning

I avrenning fra jordbruksarealer består fosforet (P) av mange ulike fraksjoner som har ulik biotilgjengelighet. I EUs Rammedirektiv for vann (Vanndirektivet; EC 2000) brukes totalfosfor (TP) som støtteparameter for å fastslå vannforekomstenes miljøstatus. I klassifiseringsveilederen (Direktoratsgruppa 2009) er det fastsatt miljømål for totalfosfor for ulike typer innsjøer og elver. Totalfosfor brukes også til å vurdere biologiske kvalitetselementers terskelverdier (f.eks. Schneider og Lindstrøm, 2011). Videre benyttes ofte totalfosfor i kost-nytteanalyser. Her oppgis gjerne kostnadseffektiviteten som kostnaden med å redusere tilførselen av ett kilo totalfosfor til en vannforekomst (Refsgaard *et al.* 2010). Imidlertid kan det være behov for

å sette spørsmålsteget om totalfosfor er den beste parameteren å bruke, ettersom det er stor forskjell på biotilgjengeligheten av fosfor fra ulike kilder. I tillegg til totalfosfor karakteriseres vannprøver ofte ved innhold av løst fosfat. Løst fosfat er imidlertid heller ikke en god parameter fordi algene også kan utnytte en del av det partikkelbundne fosforet (f.eks. Grobbelaar, 1983 og Krogstad og Løvstad, 1991).

Vår hypotese er at deler av fosforet som følger med erosjon fra jordbruksarealer kan være sterkt bundet til partiklene og mindre biologisk tilgjengelig enn fosfor fra kloakkutslipp. Det er imidlertid usikkert hvor stor andel av fosforet fra erodert jord som er biotilgjengelig og hvilken betydning dyrkingspraksis, jordas fosforstatus og erosjonsnivå har for biotilgjengeligheten. Kunnskap om dette er viktig for å kunne målrette tiltakene mot de fosforkildene som bidrar mest til algevekst. Videre har dette betydning for beregning av kostnadseffektivitet av tiltak i ulike sektorer. Med utgangspunkt i totalfosfor kan tiltakene i landbrukssektoren for å redusere algevekst i vassdragene framstå som billigere enn det de egentlig er. Det er tiltakets reduksjon i biotilgjengelig fosfor som har betydning for algeresponsen i vassdraget, og som bør ligge til grunn når kostnadseffektivitet av ulike tiltak skal beregnes. I denne artikkelen oppsummeres derfor nåværende kunnskap om biotilgjengelighet av fosfor fra arealavrenning.

Fosfor i jord

I jord er det aller meste (ca 99,9 %) av fosforet partikkelbundet (Scheffer og

Schachtschabel, 2002). Det består av både organisk og uorganisk bundet fosfor. Andelen organisk fosfor er ofte i området 20-50 % av totalfosfor (Krogstad og Løvstad, 1991). Den dyrka jorda i Norge er generelt svakt sur, noe som betyr at uorganisk fosfor er hovedsakelig bundet til jern- og aluminiumhydroksider på partiklene. I undergrunnsjord kan noe av fosforet også være bundet til kalsium (i apatitt). Mye av fosforet i jorda er så sterkt bundet at plantene ikke får tak i det. I jordbruket har det derfor i lang tid vært praksis å gjødsle med mer fosfor enn det plantene tar opp, slik at jordas fosforinnhold har bygd seg opp. Som et mål på jordas innhold av fosfor som er lett tilgjengelig for plantene brukes i Norge ammoniumlaktat (AL)-analysen. Denne fosforfraksjonen kalles P-AL og utgjør vanligvis 10-20 % av jordas totale fosforinnhold.

Biotilgjengelighet av jordas ulike fosforfraksjoner

Fosfor i jordbruksavrenning er fordelt på fraksjoner med ulike bindingsstyrke. Her skal vi diskutere biotilgjengeligheten av hovedfraksjonene løst reaktivt fosfor, partikkelbundet uorganisk fosfor og organisk bundet fosfor.

Løst fosfor

Løst fosfat eller løst reaktivt fosfor (LRP), som det også kalles, er nesten fullstendig tilgjengelig for algevekst (Løvstad, 1984; Blakar og Løvstad, 1990; Foy, 2005).

Partikkelbundet uorganisk fosfor

Erosjon er hovedkilden til partikkelbun-

det fosfor i vassdragene. I en avrennings-situasjon hvor jorda kommer i kontakt med vann som har en lavere fosforkon-sentrasjon enn likevektskonsentrasjonen i jorda, vil en betydelig del av partikkel-bundet fosfor frigis. Andelen av totalfos-for som er vannløselig øker med økende P-AL tall (Øgaard, 1995; Krogstad og Løvstad, 2002). I et forsøk hvor fosfat-konsentrasjonen i løsningen ble holdt lav med hjelp av ionebytter som adsorberer fosfat ble en økende andel av jordas uorganiske fosforinnhold frigitt med økende P-AL nivå i jorda (Øgaard, 1995). Det ble frigitt 6 % fra jord med lav P-AL verdi (P-AL 3,5) og 14 % ved høyt P-AL (P-AL 13). Mengde frigitt fosfor var 10-20 % høyere enn P-AL verdien. I tillegg har også jordtypen betydning. Ved samme P-AL nivå ble det funnet at en større andel av totalfosfor er vannløselig i silt- og sandjord sammenlignet med leirjord (Øgaard, 1995). Det betyr at både jordas P-AL tall og jordtypen har betydning for hvor mye fosfor som blir løselig ved ero-sjon og avrenning.

Det er dessuten vist at biotilgjengelighet av partikkelbundet fosfor kan være større enn det som kan forklares ved likevektsreaksjoner (Grobbelaar, 1983). Grobbelaar (1983) mente at organiske forbindelser utskilt av algene kan bidra til å øke desorpsjonen av partikkelbun-det fosfor. I sterkt eutrofe innsjøer med høy pH, kan en også få økt desorpsjon på grunn av det høye pH-nivået, fordi bin-dingen av fosfor til jern- og aluminium-forbindelser avtar med økende pH. Resultater fra algeforsøk tyder på at det er fosfor bundet til jern- og aluminium-

fosforet i form av fytinsyre (Scheffer og Schachtschabel, 2002). Det betyr at en vesentlig del av det organiske fosforet i vassdrag som stammer fra erodert jord kan ha en lav algetilgjengelighet. Det er da også i flere undersøkelser konkludert med at organisk fosfor fra jordbruksarealer synes å være lite tilgjengelig for alger (f.eks. Krogstad og Løvstad, 1991; Sharpley *et al.* 1991; Dorich *et al.*, 1985). Krogstad og Løvstad (1991) fant at selv i et 4-ukers vekstforsøk var organisk fosfor ikke tilgjengelig for algene.

Løst fosfat i overflateavrenning

Andelen løst fosfat av totalfosfor i overflate- og grøfteavrenning er avhengig av partikkelkonsentrasjonen i vannet, figur 1. Ved høy partikkelkonsentrasjon er bare en liten andel av totalfosfor i form av løst fosfat. Dette har sammenheng med likevektsforholdet mellom partikkelbundet og løst fosfor. Dette betyr at ved høy partikkelkonsentrasjon er det en del partikkelbundet fosfor som antagelig frigis nedstrøms når det partikkelbelastede vannet fortynnes og konsentrasjonene

av løst fosfat reduseres. Løst fosfat er derfor ikke et godt mål på biotilgjengelig fosfor i partikkelbelastet vann.

Biotilgjengelighet av fosfor i avrenning ved ulike jordbruksdrift

Sharpley (1993) har undersøkt biotilgjengelighet av fosfor i avrenning fra ulike jordbrukssystemer tabell 1. Biotilgjengeligheten av fosfor i avrenningen ble målt ved hjelp av en ionebytter som holder fosforkonsentrasjonen i løsningen lav og dermed økte frigjøringen av partikkelbundet fosfor.

Tapene av både totalfosfor og løst reaktivt fosfor var betydelig høyere ved konvensjonell jordarbeiding enn ved de andre driftssystemene. Andelen biotilgjengelig fosfor i avrenningen var imidlertid mye høyere i systemene med eng eller ingen jordarbeiding enn i systemene med jordarbeiding. Også det partikkelbundne fosforet hadde høyest biotilgjengelighet i systemene uten jordarbeiding. Forskjellene i tap av biotilgjengelig fosfor var derfor mindre enn forskjellene i totalfosfortap. Uten jordarbeiding blir

Drift	TP g/daa	LRP g/daa	BioP g/daa	BioP/TP %	Biotilgj. PP/PP %
Naturlig eng	21	13	18	83	58
Ingen jordarbeiding	64	3	44	69	35
Redusert jordarbeiding	82	5	20	25	20
Konvensjonell jordarbeiding	386	39	123	32	24

Tabell 1. Tap av totalfosfor (TP), løst reaktivt fosfor (LRP) og biotilgjengelig P (BioP), samt biotilgjengelighet av TP og partikkelbundet P (PP) i avrenning fra ulike jordbruksystemer (Sharpley, 1993).

det økt konsentrasjon av fosfor i toppsjiktet, og fosforet i overflateavrenningen blir derfor mer biotilgjengelig. Disse resultatene samsvarer med norske resultater som viste en betydelig høyere andel løst fosfor fra engarealer enn fra kornarealer med konvensjonell jordarbeiding (Uhlen, 1989), tabell 2. Enga fikk bare tilført mineralgjødning i dette forsøket. Liten erosjon på forsøksarealet er årsak til at også tapet av totalfosfor var lavest fra kornarealet i dette forsøket. Andre forsøk med jordarbeiding til høstkorn viser tilsvarende som Sharpley (1993) at det er høyere konsentrasjon av løst fosfat ved høy erosjon, fordi fosfor løses ut fra partiklene i erosjonsprosessen (Grønsten *et al.*, 2007).

Overflatespredd gjødning på gras, utfrysing av fosfor fra plantemateriale og et generelt høyere innhold av både totalfosfor og lett tilgjengelig fosfor i jorda bidrar til en høyere andel løst fosfor i jordbruksavrenning i gras/husdyrområder sammenlignet med kornområder (Bechmann *et al.*, 2005). Dette antyder at en kan forvente høyere biotilgjengelighet av fosfor i jordbruksavrenning i gras-/husdyrområder enn i kornområder.

Innsjøprosesser som påvirker biotilgjengelighet av fosfor i jordbruksavrenning

For å studere hva som skjer når fosforet kommer ut i resipienten er det utført en rekke laboratorietester med alger. Disse testene er utført med ulike metoder og med ulike testalger, og har derfor gitt svært ulike resultater. Mange av algetestene har gitt en gjennomsnittlig biotilgjengelighet av totalfosfor i jordbruksavrenning i størrelsesorden 20-40 %, men variasjonen er stor (Krogstad og Løvstad, 1989, 1991, 2001; Berge og Källqvist, 1990; Ekholm og Krogerus, 2003; Young og DePinto, 1982; Dorich *et al.*, 1980, 1985). Krogstad og Løvstad (1991) viste at med økende andel av organisk fosfor i jorda ble biotilgjengeligheten av totalfosfor redusert.

Laboratorietester utføres under kontrollerte og ofte optimale forhold. Ute i innsjøen er det en rekke andre faktorer som kan påvirke biotilgjengeligheten av fosfor. Betydningen av vannets oppholdstid og sirkulasjonsforhold for eutrofitilstanden i innsjøen er blitt diskutert av bl.a. Dillon (1975) og Janus og Vollenveider (1984). Høy gjennomstrømning øker ofte innsjøens toleranse mot høye tilførsler av fosfor. Innsjøens dybde er også av

	Korn	Eng
LRP, mg/L	0,07	0,41
TP, mg/L	0,18	0,50
LRP/TP %	39	82

Tabell 2. Middelerverdier i overflateavrenning for perioden 1974 –1981 for løst reaktivt fosfor (LRP), totalfosfor (TP) og andel LRP av TP i et avrenningsforsøk på Ås, Akershus (Uhlen, 1989).

betydning, da sedimentet i grunne innsjøer kan resuspendere og friggi bundet fosfor til algene (f.eks. Da-Peng og Yong, 2010). I dype innsjøer er det større sannsynlighet for at sedimenterte fosforholdige partikler forblir i sedimentene, men forhold som temperatur og pH kan allikevel løse ut fosfor også i slike innsjøer. I en innsjø hvor vannet i perioder av året har liten utskifting og høy temperatur vil det bli oksygenmangel i bunnsedimentene. Fosfor bundet til jernhydroksider blir mobilt ved at treverdige jern (Fe^{3+}) reduseres til toverdige jern (Fe^{2+}), og det registreres ofte en økning i fosforkonsentrasjonen i vannet. Et eksempel på dette er vist i figur 2 hvor det skjer en kraftig økning av fosforkonsentrasjonen i vannfasen rett over bunnsedimentene ved redusert oksygeninnholdet i vannet (Løvstad *et al.*, 1992). Ved sirkulasjon kan frigitt fosfor komme høyere opp i vannmassene. I tillegg, cyanobakterier som gjerne dominerer under eutrofe forhold, har evne til å bevege seg vertikalt i vannmassene og kan hente fosfor som er frigitt i innsjøens bunnlag (Head *et al.*, 1999; Nausch *et al.*, 2012). I innsjøer med kraftig algevekst kan det bli høy pH som også øker frigjøringen av partikkelbundet fosfor.

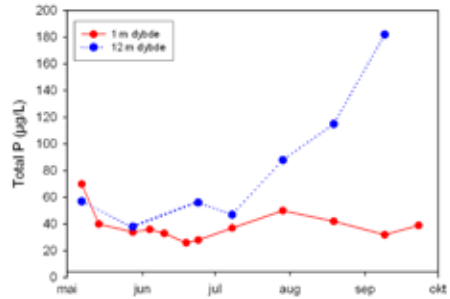
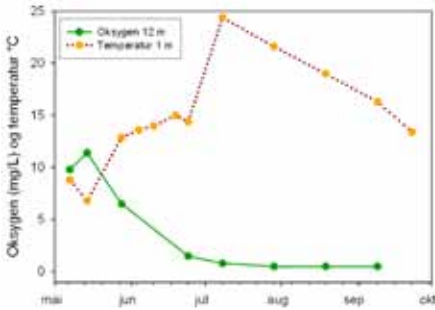
På den annen side endrer jorda kjemisk karakter når den over tid lagres som sediment, og bindingskapasiteten for fosfor øker vesentlig på grunn av økning i mengden amorfe jernoksider i sedimentene (Krogstad, upubl.). Dette betyr at ved tilstrekkelig med oksygen kan løst fosfat i vannmassene bindes til sedimentene.

Det er et spørsmål om i hvilken grad

organisk bundet fosfor blir mineralisert i resipienten over tid. I en undersøkelse av topplaget i dyrka jord i nedbørfeltene til innsjøene Årungen i Akershus og Vansjø i Østfold ble det funnet at henholdsvis 32,6 % og 30,6 % av det totale fosforinnholdet var organisk bundet (Krogstad, upubl.). I de øverste 5 cm av sedimentene i innsjøbassengene hvor erosjonsmaterialet fra den undersøkte jorda sedimenteres, var andelen av organisk fosfor redusert til henholdsvis 18,7 % og 24,7 %. Disse undersøkelsene tyder på at det kan ha skjedd en viss mineralisering av organisk fosfor, men at også en del av denne fraksjonen forblir utilgjengelig for algene, fordi sedimentene fortsatt inneholder en betydelig andel organisk fosfor.

Algenes evne til vekst er avhengig av faktorer som temperatur og lys i tillegg til tilgang på næringsstoffer. Høyt innhold av erosjonspartikler i vannmassene gir dårlige lysforhold. I noen innsjøer med god tilgang til næringsstoff er det antatt at lystilgang kan være den viktigste algebegrensende faktor (Skarbøvik *et al.*, 2010). Dette kan illustreres med stor skala algetester som er utført av Berge og Källqvist (1990). De utførte tester i 2000 liters innhegninger som var plassert ute i en innsjø. Forsøket ble utført både med og uten sirkulasjon i innhegningene som var fire meter dype. I innhegninger med sirkulasjon var biotilgjengeligheten av fosfor i landbruksjord 1/3 av det som ble funnet i laboratorietester; det vil si cirka 13 % av totalfosfor. Uten sirkulasjon var bare 6 % av totalfosfor biotilgjengelig.

Det kan tenkes at alt partikkelbundet fosfor tilslutt vil bli tilgjengelig for algene,



Figur 2. Utviklingen i temperatur, oksygen og totalfosfor i vannmassene ved 1 m og 12 m dyp i Årungen i 1991. 12 m dyp var rett over bunnsedimentene (Fra Løvstad et al., 1992).

men i dypere lag av bunnsedimentet finnes det partikkelbundet fosfor som er overdekt av nye sedimenter og derfor ikke lenger biotilgjengelig. Undersøkelser av sedimenter i Årungen viste at gjennomsnittlig fosforinnhold i sedimentlaget 2,5-5 cm under sedimentoverflaten var 1,7 g/kg tørrstoff, men verdier opp mot 2,5 g/kg ble funnet i den dypeste delen av innsjøen (Riise et al., 2010). Jo finere partiklene i sedimentet var, jo høyere var fosforkonsentrasjonen. Disse verdiene er høyere enn det totale fosfornivået i dyrka i jord i området rundt Årungen som var gjennomsnittlig 1,1 g/kg, men gjennomsnittsverdien er på nivå med gjennomsnittsverdien for partikkelnes fosforkonsentrasjon i en jordbruksbekk med avrenning til Årungen (Deelstra et al., 2011). Her var i gjennomsnitt for 20 år partikkelnes fosforkonsentrasjon på 1,7 g/kg. En av årsakene til høyere fosforkonsentrasjon i sedimentene enn i dyrkingsjord, er at ved erosjon følger de minste og mest fosforrike partiklene med vannstrømmen i større grad enn de større og mer fosforfattige partiklene. En

undersøkelse av sedimentkjerner i Vansjø tilbake til midten av 1800-tallet viste at fosforinnholdet i sedimentene varierte omkring 1 g/kg tørrstoff (Hobæk et al., 2009). I det dypeste bassenget av innsjøen, Storefjorden, lå fosforinnholdet på et jevnt nivå rundt 1 g/kg fra midten av 1800-tallet og frem til i dag. I det grunnere bassenget Vanemfjorden, økte imidlertid fosforinnholdet i de øvre sedimentlagene, dvs. på 1900-tallet, fra ca. 0,6 g/kg til ca. 1,2 g/kg. Dette betyr at en del av de økte fosfortilførselene har havnet i innsjøens sedimenter.

Biotilgjengelighet av fosfor i erosjonsmateriale sammenlignet med fosfor fra husdyrgjødsel og kloakk

Berge & Källqvist (1990) fant i laboratorietester med alger at biotilgjengelighet av fosfor i kloakk og husdyrgjødsel var cirka dobbelt så høy som biotilgjengeligheten av fosfor i arealavrenning fra korn dyrkingsarealer. Ekholm og Krogerus (2003) fant 2-3 ganger så høy biotilgjengelighet av fosfor i kloakk sammenlignet

med fosfor i overflateavrenning fra jordbruksarealer. I innhegningsforsøket fant Berge og Källqvist (1990) cirka 5 ganger større biotilgjengelighet av fosfor i kloakk og husdyrgjødsel sammenlignet med fosfor i jord. Skyggevirksomheten av jordpartikler kan være årsak til at det var større forskjell i biotilgjengelighet i innhegningsforsøket enn i laboratorietester.

Konklusjon

Hypotesen som lå til grunn for denne artikkelen var at fosfor i erosjonsmateriale er mindre biotilgjengelig enn fosfor som stammer fra kloakkavløp. Litteraturgjennomgangen har vist at det er stor sannsynlighet for at denne hypotesen stemmer, men det er mange og kompliserte prosesser som styrer i hvilken grad fosfor fra arealavrenning bidrar til algevekst. Dette betyr at andelen av totalfosfor i jordbruksavrenning som er biotilgjengelig fortsatt er uavklart. Den potensielle biotilgjengeligheten av fosfor i jordbruksavrenning avhenger av fosforets fordeling på ulike fosforfraksjoner, og vil derfor variere med jordtype og oppgjødslingsgrad av jorda. Ute i innsjøen påvirkes biotilgjengeligheten av faktorer som innsjøens dyp, gjennomstrømningshastighet, sirkulasjon, pH, temperatur og algesammensetning. Fosfor fra jordbruksavrenning vil derfor kunne gi vidt forskjellig grad av algetilgjengelighet avhengig av hvilken type innsjø dette fosforet tilføres og når på året det tilføres. For eksempel, i partikkelbelastet vann ventes mindre algevekst enn det konsentrasjonen av totalfosfor skulle tilsi, på grunn av skyggevirksomhet fra partiklene.

I innsjøen kan derfor den relative forskjellen i biotilgjengelighet mellom partikkelbundet fosfor og andre fosforkilder som kloakk være større enn det laboratorietester viser, fordi kloakk ikke reduserer lystilgangen i samme grad som jordpartikler.

For å komme nærmere en riktigere vurdering av fosfortapet i arealavrenning sammenlignet med fosfor fra andre kilder, er det spesielt to områder hvor det trengs mer kunnskap:

- Jord er ikke en ensartet kilde når det gjelder innhold av biotilgjengelig fosfor. Det er derfor behov for analysemetoder som kan kvantifisere innhold av potensielt biotilgjengelig fosfor i jord og erosjonsmateriale; det vil si den delen av jordas fosfor som kan bli tilgjengelig ved optimale betingelser for algene.
- Den relative responsen på fosfor i jordbruksavrenning sammenlignet med fosfor fra kloakk er avhengig av en rekke faktorer i innsjøen. Det er derfor behov for utvikling av modeller som kan bidra til klassifisering av innsjøer i forhold til algenes mulighet til å utnytte fosforet i jordbruksavrenning, både på kort og lang sikt.

Referanser

Bechmann, M., Berge, D., Eggestad, H.O. & Vandsemb, S. 2005. Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes - two long-term integrated studies from Norway. *J. Hydrology* 304 (1-4): 238-250.

- Berge, D. & Källqvist, T. 1990. Biotilgjengelighet av fosfor i jordbruksavrenning sammenlignet med andre forurensningsskilder. NIVA Rapport, O-87064: 130 s.
- Blakar, I. & Løvstad, Ø. 1990. Determination of available phosphorus for phytoplankton populations in lakes and rivers of southeastern Norway. *Hydrobiologia* 192: 271-277.
- Da-Peng, L. & Yong, H. 2010. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension. *Ecol. Eng.* 36: 958-962.
- Deelstra, J. 2010. Skuterudbekken 2010. I Hauken, M. (red.) *Jord- og vannovervåking i landbruket (JOVA)*. Bioforsk rapport 7/48. 13-16.
- Direktoratsgruppa Vanndirektivet, 2009. *Klassifisering av miljøtilstand i vann*. Veileder 01:2009. 180 s.
- Dillon, P.J. 1975. The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario: The importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes. *Limnol. Oceanol.* Vol 20, No. 1: 28-39.
- Dorich, R.A., Nelson, D.W. & Sommers, L.E. 1980. Algal availability of sediment phosphorus in drainage water of the Black Creek watershed. *J. Environ. Qual.* 9 (4): 557-563.
- Dorich, R.A., Nelson, D.W. & Sommers, L.E. 1985. Estimating algal available phosphorus in suspended sediments by chemical extraction. *J. Environ. Qual.* 14 (3): 400-405.
- Ekholm, P. & Krogerus, K. 2003. Determining algal-available phosphorus of differing origin: routine phosphorus analyses versus algal assays. *Hydrobiologia* 492: 29-42.
- Foy, R.H. 2005. The return of the phosphorus paradigm: Agricultural phosphorus and Eutrophication. In: Sims, J.T. and Sharpley, A.N. *Phosphorus: Agriculture and the environment*. *Agronomy* 46: 911-939.
- Golterman, H.L., Bakels, C.C. & Jakobs-Mogelin, J. 1969. Availability of mud phosphates for the growth of algae. *Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.* 17: 467-469.
- Grobbelaar, J.U. (1983). Availability to algae of N and P adsorbed on suspended solids in turbid waters of the Amazon River. *Arch. Hydrobiol.* 96: 302-3016.
- Grønsten, H.A., Øygarden, L. & Skjevdal R.M. 2007. Jordarbeiding til høstkorn – effekter på erosjon og avrenning av næringsstoffer. *Bioforsk Rapport* 2(60), 71s.
- Head, R.M., Jones, R.I., Bailey-Watts, A.E. 1999. Vertical movements by planktonic cyanobacteria and the translocation of phosphorus: implications for lake restoration. *Aquat. Conserv.* 1 (9): 111-120.
- Hegemann, D.A., Johnson, A.H. & Keenan J.D. 1983. Determination of algal-available

- able phosphorus on soil and sediment: A review and analysis. *J. Environ. Qual.* 12 (1): 12-16.
- Hobæk, A., Bjørndalen, K., Grung, M., Johansen, S.W., Rohrlack, T., Solheim, A.L., Bennion, H. Burgess, A. & Yang, H. 2009. Utredninger Vansjø 2006 – Undersøkelser av naturtilstanden og eutrofiseringsutviklingen i Vansjø. NIVA-rapport 5460. 48 s.
- Janus, L.L. & Vollenweider, R.A. 1984. Phosphorus residence time in relation to trophic conditions in lakes. *Verh. Internat. Verein Limnol.* Vol 22, No. 1: 179-184.
- Krogstad, T. 1986. Fosfor i erosjonsmaterialet. NLVF-rapport nr 643: 13s.
- Krogstad, T. & Løvstad, Ø. 1989. Erosion, phosphorus and phytoplankton response in rivers of South-Eastern Norway. *Hydrobiologia* 183:33-41.
- Krogstad, T. & Løvstad, Ø. 1991. Available soil phosphorus for planktonic blue-green algae in eutrophic lake water samples. *Arch. Hydrobiol.*, 122: 117-128.
- Krogstad, T. & Løvstad, Ø. 2001. Effects of EDTA, FeEDTA and soils on the phosphorus bioavailability for diatom and blue-green algal growth in oligotrophic waters studied by transplant biotests. *Hydrobiologia* 450:71-81.
- Krogstad, T. & Løvstad, Ø. 2002. Tunevannets nedbørfelt – Undersøkelse av fosfor i jord 2001. IJVf Rapport 6: 5s.
- Løvstad, Ø. 1984. Competitive ability of laboratory batch phytoplankton populations at limiting nutrient levels. *Oikos* 42: 176-184.
- Løvstad, Ø., Krogstad, T. & Lid Larsen, Ø. 1992. Overvåking av Årungen 1991. Miljøvernadv. Akershus fylkeskommune, Rapport 2/92:35s. ISBN 82-7473-023-2.
- Nausch, M., Nausch, G., Mohrholz, V., Siegel, H. & Wasmund, N. 2012. Is growth of filamentous cyanobacteria supported by phosphate uptake below the thermocline? *Estuar Coast Shelf S* 99: 50-60.
- Refsgaard, K. M. Bechmann, A.-G. B. Blankenberg, S. Skøien & A. Veidal (2010): Kostnadseffektivitet for tiltak mot fosfortap fra jordbruksarealer i Østfold og Akershus. NILF Rapport 2010-2. Norsk institutt for landbruksøkonomisk forskning og Bioforsk.
- Riise, G., Krogstad, T., Blakar, I., Gjengedal, E., Haaland, S., Kristiansen, J., Naas, K.Reierstad, T.Å., Romarheim, A. T., Rutsinda, J. & Zambon, S.B. 2010. Akkumulering av næringsstoffer og spormetaller i Årungen sedimenter – sedimentenes betydning som fosforkilde. IPM Rapport 2:23s. ISBN 82-483-0061-7.
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. 2002. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Sneider, S. & Lindstrøm, E.A. 2011. The periphyton index of trophic status PIT: a

- new eutrophication metric based on non-diatomaceous benthic algae in Nordic rivers. *Hydrobiologia* (2011) 665:143–155.
- Sharpley, A.N. 1993. Assessing phosphorus bioavailability in agricultural soils and runoff. *Fertilizer Research* 36: 259-272.
- Sharpley, A.N., Troeger, W.W. & Smith S.J. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Environ. Qual.* 20: 235-238.
- Skarbøvik, E., Bechmann, M., Rohrlack, T. & Haande, S. 2010. Overvåking Vansjø/Morsa 2008-2009. Resultater fra overvåkingen av innsjøer, elver og bekker i perioden oktober 2008 – oktober 2009. *Bioforsk Rapport* 5(12) 2010, 133 s.
- Stevens, R.J. & Stewart, B.M. 1982. Concentration, fractionation and characterisation of soluble organic phosphorus of river water entering Lough Neagh. *Water Res.* 16: 1507-1519.
- Uhlen, G., 1989. Nutrient leaching and surface runoff in field lysimeters on a cultivated soil. Nutrient balances 1974-81. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences* 3, 33-46.
- Young, T.C. & DePinto, J.V. 1982. Algal-availability of particulate phosphorus from diffuse and point sources in the lower Great Lakes Basin. *Hydrobiologia* 91: 111-119.
- Whitton, B.A., Grainger, S.L.J., Hawley, G.R.W. & Simon, J.W. 1991. Cell bound and extracellular phosphatase-activities of cyanobacterial isolates. *Microbial Ecol.* 21: 85-98.
- Øgaard, A.F. 1995. Effect of phosphorus fertilization and content of plant-available phosphorus (P-AL) on algal-available phosphorus in soils. *Acta Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci.* 45: 242-250.