

Fosfatenes virkning på resipienten

Av Hans Holtan

Hans Holtan er cand.real. og divisjonssjef på NIVA.

*Innlegg holdt i Norsk Vannforening
29. mars 1982.*

Innledning

Eutrofiering av innsjøer, elver og fjorder er en av vår tids største forurensningsproblemer. Det er vel ikke lengere noen tvil om at disse problemer skyldes mennesket og dets mangfoldige aktiviteter. Avhengig av de faglige forutsetninger hos debatantene har diskusjonen til dels gått meget høyt med hensyn til hvilke faktorer som er avgjørende for eutrofieringen. Enkelte har fremholdt karbon som begrensende faktor for algevekst, andre har ment at fosfor og nitrogen er avgjørende, atter andre har pekt på betydningen av jern, enzymer, lys, temperatur osv. Endringer i fiskebestanden er også trukket frem som et moment. Diskusjonen har kanskje vært spesielt hard når det gjelder nitrogenets kontra fosforets rolle for eutrofieringen.

Forskere som har arbeidet seriøst med eutrofieringsproblemer, har for lenge siden påvist fosforets sentrale rolle for økning av algevekst i vannforekomster. Virkningen av tilførselen av en bestemt fosformengde vil imidlertid modifieres av bl.a. faktorer nevnt ovenfor så vel som vannforekomstens størrelse, form, vanngjennomstrømning osv. samt fosforets tilstandsform.

Fosforfraksjoner og fosfordynamikk

Avhengig av kilde og opprinnelse vil fosforet som tilføres vannforekomster foreligge i forskjellig form eller fraksjoner. I limnologisk terminologi skiller man mellom følgende fosforfraksjoner definert ut fra analysemetoden:

- Total fosfor (*TP*) omfatter både løst og partikulært fosfor analysert ved molybdatmetoden etter persulfatopp-slutning.
- Løst reaktivt fosfor (*LRP*) — bestemt ved molybdatmetoden etter filtrering (membranfilter).
- Løst ikke reaktivt fosfor (*LIRP*) bestemmes som *TP* etter filtrering (membranfilter) ÷ *LRP*.
- Partikulært fosfor (*PP*) er differansen mellom *TP* og *LIRP* + *LRP*.
- Biologisk tilgjengelig fosfor (*BTP*) er fosfor tilgjengelig for algene.

LRP som kan være mye større (opptil 100 x) enn ortofosfatinnholdet, blir ofte betraktet som *BTP*. Dette er ikke riktig, idet planteplanktonet også kan gjøre seg nytte av *LIRP*, og det er derfor viktigere å betrakte *BTP* som summen av *LRP* og *LIRP*, samt fosfor adsorbert til partikler o.l. (labilt fosfor). Det er imidlertid meget vanskelig å bestemme algetilgjengelig fosfor. Dette bl.a. på grunn av at primærproduksjonen (algeproduksjonen pr. tids-

enhet) er en hastighetsbestemt reaksjon som i vesentlig grad er bestemt av «turn-overhastigheten» (dvs. den tid det tar å nydanne fosfor via dekomponering). Algetester (vekstpotensialmålinger) kan derfor være et bedre mål på algetilgjengelig fosfor enn kjemiske analyser.

Fosfortilførsler

Fosfortilførselens biologiske effekt i innsjøer er betinget både av forholdet mellom de ulike fosforfraksjoner og tilførselens vannføring og vannføringsvariasjon. Noen viktige betraktninger omkring tilførselens biologiske effekt er summert i det følgende.

Den største delen av den totale fosformengde som transporteres ut av et nedbørfelt er knyttet til partikulært materiale suspendert i vannet. Mesteparten av dette tilføres i løpet av relativt kort tid under flomperioder f.eks. under snøsmeltingen om våren. Den løste fraksjon kan i slike perioder utgjøre bare 5—10% av den totale mengde. Når dette fosforet når innsjøer, vil den partikulære fraksjon snart sedimentere fordi vannets bevegelse ikke lenger er i stand til å holde store partikler i suspensjon, mens de mindre partikkelfraksjoner fortsatt vil være i suspensjon. Den partikulære fosforfraksjonen vil således bli unndratt produksjonssonen og i liten grad umiddelbart bidra til biologisk aktivitet. Da det partikulære materiale også er i stand til å adsorbere løst fosfor, vil sedimentasjonsprosessen bidra til at den løste fraksjon reduseres.

Innsjøens egenskaper som fosforfeller er avhengig av deres størrelse, dybde og vannutskiftningsgrad. I f.eks. Mjøsa hvor vannet har en teoretisk oppholdstid på 6 år, holdes ca. 70% av tilført fosfor tilbake, mens i Maridalsvatnet med en teoretisk

oppholdstid på 0,5 år er tilbakeholdelses-koeffisienten ca. 40% (teoretisk sett).

Fosfor både løst og partikulært, kan særlig i lavvannsperioder bli holdt tilbake i elvene ved

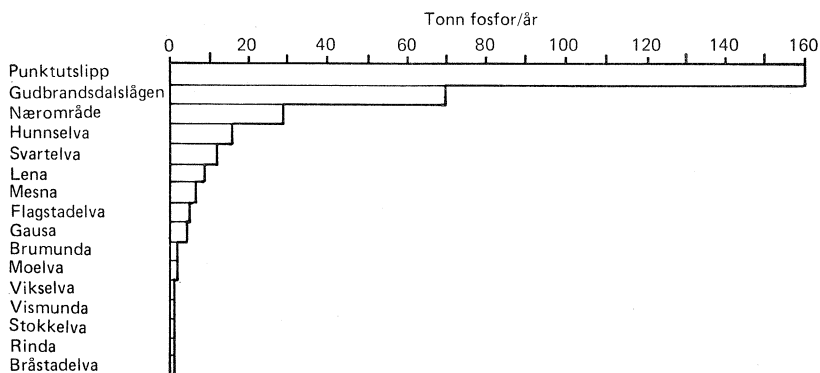
- sedimentasjon
- adsorpsjon til sedimentene
- biologisk reaksjon.

Under flomperioder finner en utvasking eller utspyling sted, og fosforet blir transportert videre. I hvilken form det da befinner seg er avhengig av flere forhold. F.eks. er det en likevekt mellom mengde fosfor adsorbent til partikler og fosforkonsentrasjon i vann. Reduseres vannfasens fosforinnhold vil derfor fosfor frigjøres fra partiklene (desorpsjon). Videre vil den biologiske aktivitet i vassdraget kunne føre til en endring av forholdet mellom de ulike fraksjoner. Spesielt gjelder dette fosfor som er bundet til organisk materiale. Mange biologiske reaksjoner kan omdanne organisk fosfor til fosfor i en biologisk aktiv form.

Fosforkildenes beliggenhet i forhold til vannforekomsten er av vesentlig betydning for både fosformengde og fraksjonsform som når frem til den aktuelle vannforekomst. Fosforkildene i vannforekomstens nærrområde har således langt større betydning enn mer fjerntliggende og perifere kilder (fig. 1). Fosforet som tilføres et vassdrag lenge før dette munner ut i den aktuelle vannforekomst, vil i stor grad sedimentere eller biologisk omsettes før det når frem.

De viktigste menneskelige aktiviteter som bidrar til økt fosfortilførsel, er jordbruk, bosetting og industri.

I avrenningsvann fra jordbruksområder dominerer den partikulære fraksjon, mens



Figur 1. Årlig fosfortilførsel til Mjøsa via tilløpselver, diffuse tilførsler fra nærrområder og punktutslipp. (Etter Holtan 1981).

i sigevann fra gjødselkjellere, gjødsel fra frossen mark, førsilo, melkerom osv., har den løste fosforfraksjonen langt større betydning.

Kloakkvannets innhold av fosfor er i Norge beregnet til 2,5 g fosfor pr. person og døgn, hvorav 0,7 g stammer fra vaske-midler. Kloakkvannet tilføres vannforekomsten dels som punktutslipp (byer og tettsteder) og til dels mer diffust. En stor del av kloakkvannets fosfor foreligger i løst form, og det er i denne sammenheng grunn til å nevne vaskemiddel-fosforet som i det vesentligste foreligger som lett løselige polyfosfater og følgelig i langt større grad enn andre kilder stimulerer algevekst.

Innenfor industrien er det i første rekke næringsmiddelindustri, meierier, slakterier og visse metallurgiske industrier som skaper de største problemer. Fra mange slike kilder blir også fosforet tilført vassdragene i en løst reaktiv form.

Fosfor — biologisk respons

Så tidlig som i førtiårene (Sawyer 1947) ble det påvist at det måtte være en nær sammenheng mellom algevekst og fosforkonsentrasjon i innsjøer. Sawyer konkluderte med at innsjøer med en vinterkonsentrasjon av total fosfor på 10 $\mu\text{g P/l}$, ville den påfølgende sommer ha en sjenerende høy algevekst. Senere er den nære sammenheng mellom fosfor og biologisk respons blitt påvist av en rekke forskere verden over (Vollenweider 1968, 1975, 1976, 1981, Vollenweider og Dillon 1974, Dillon og Rigler 1974, Berge, Rognerud og Johannessen 1979, Holtan 1979 og 1981 osv.). Problemet har også vært tema for et stort arbeid som er utført i regi av OECD, hvor over 50 seriøse forskningsinstitusjoner fra 18 land deltok. Resultatet av dette arbeidet understreker på en overbevisende måte fosforets rolle for eutrofieringen.

Selv om relasjonen mellom fosfor og biologisk respons som er formulert gjennom de ulike arbeider, er meget verdifulle

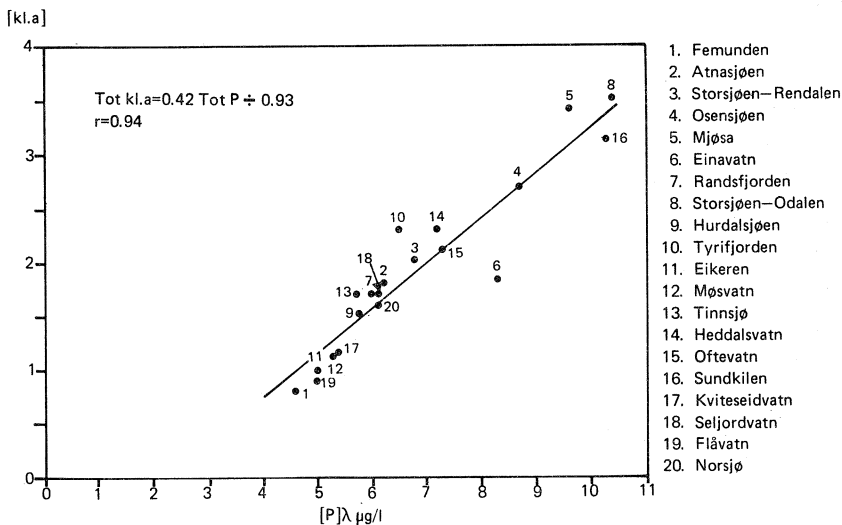
ved vurdering av fosforbelastning/vannkvalitet, har de sine klare begrensninger og de kan derfor ikke brukes ukritisk i arbeidet med vassdragsplanlegging m.v. Det er mange faktorer det her må taes hensyn til, bla.:

- Er fosfor begrensende faktor for algevekst
- Innsjøens geografiske beliggenhet
- Innsjøens utforming og dybde
- Vanngjennomstrømming og vannets oppholdstid
- I hvilken grad gjør indre gjødsling seg gjeldende
- Betydningen av dyreplankton og fisk
- Fosforets mengde og tilstandsform (partikulært, løst)

— Relasjonene gir bare holdepunkter om langtidsutvikling og fanger ikke opp effekten av næringssalttilførsel til produksjonslagene i vekstperioden.

Forholdet mellom fosforkonsentrasjon og algemengde er dokumentert for 20 innsjøer i Østlands-området (Berge, Rognerud og Johannessen 1980). Dette er innsjøer som er lite til moderat forurenset og har en midlere fosforkonsentrasjon (total fosfor) på mellom 4 og 11 $\mu\text{g P/l}$. Innsjøene blir fullstendig blandet vår og høst og sedimentene er fortsatt intakte. Sammenhengen mellom årsmiddelkonsentrasjon av fosfor og midlere sommerklorofyll er vist i fig. 2.

Tidligere arbeider (Vollenweider 1976) har vist at innsjøenes størrelse, dyp og



Figur 2. Sammenhengen mellom årsmiddelkonsentrasjonen av fosfor i hele sjøen (P)λ og gjennomsnittlig algebiomasse (kl a) i epilimnion i sommerhalvåret. (Etter Berge & Co. 1979).

Tabell 1. Årsvannføring, teoretisk oppholdstid, fosforbelastning, beregnet sommerklorofyll og målt sommerklorofyll (mai—oktober) i Mjøsa i 1976, 1977, 1978, 1979 og 1980.

x = beregnet.

| | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 |
|--|--------|--------|--------|-------|---------|
| Årsvannføring (Vorma) i mill. m ³ | 8501,4 | 8797,2 | 8740,7 | 11007 | 9646,9 |
| Teoretisk opph.tid i år, T _w | 6,6 | 6,4 | 6,4 | 5,1 | 5,8 |
| Total fosforbelastn. i tonn/år | 308 | 230 | 219 | 252 | 195 (x) |
| Midlere fosforkons. i tilløp, µg P/l, [P] _i | 36,2 | 26,1 | 25,0 | 22,9 | 23,3 |
| Midlere fosforkons. i innsjøen µg P/l, [P] _λ | 10,3 | 10,0 | 10,0 | 10,2 | 9,0 |
| Beregnet [P] _λ i µg P/l (2) | 14,7 | 10,7 | 10,3 | 10,3 | 8,6 |
| Beregnet [kl a] (3), mg/m ³ | 5,2 | 3,6 | 3,4 | 3,4 | 2,7 |
| Målt [kl a] sommermidler mg/m ³ | 5,0 | 3,6 | 3,6 | 3,5 | 2,7 |

grad av vannfornyelse er avgjørende faktorer for hvilken biologisk respons en bestemt tilførselsmengde av fosfor vil gi. Relasjonene som er utarbeidet i den sammenheng, er av ovenfornevnte forskere tilpasset store (dype) norske innsjøtyper, og dette har gitt oss et nyttig redskap ved en bestemt fosforbelastning. Dette er eksemplifisert i tabell 1, som viser målt og beregnet fosforkonsentrasjon og algemengde (klorofyll a) i Mjøsa i tidsperioden 1976 til 1980.

Selv om slike relasjoner i store trekk synes å fungere bra, må det som tidligere nevnt være helt klart at det er en rekke viktige faktorer — ikke minst biologiske — som ikke inngår i beregningene, men som kan ha stor betydning for økosystemet. I mange innsjøer, særlig i de grunne, er sedimentene av stor betydning som tilførselskilde (indre belastning) både ved resuspensjon av partikulært materiale og ved frigjøring av fosfor både under anaerobe og aerobe (høy pH) forhold. Betydningen av den indre belastning for alge-

veksten er avhengig av bl.a. vanntemperatur og gjennomstrømning og vil således variere fra år til år avhengig av de klimatiske forhold. Dyreplanktonets og fiskens rolle i innsjøens stoffomsetning er det også nødvendig å ta hensyn til. Resultatene av den senere tids forskning synes å tyde på at disse faktorer kan spille en betydelig modifierende rolle for eutrofikasjonsprosessen.

Dette er årsaken til at avlastningstiltak for slike innsjøer ofte ikke gir den forventede effekt i hvertfall ikke i første omgang. Det er mulig man gjennom effektive forurensningsbegrensende tiltak kombinert med tiltak i selve innsjøen, kan bringe slike innsjøer på fote igjen.

Som regel er det innsjøens overflatelag som utsettes for forurensningstilførsler og fosforbelastning. Dette betyr at under vekstperioden om sommeren er det produksjonslagene som utsettes for belastningen. Resultatet er stor algevekst selv om den midlere fosforkonsentrasjon i inn-

sjøen er relativt lav. I slike innsjøer vil en avlastning gi hurtig respons med hensyn til redusert algevekst slik tilfelle var for Mjøsa.

Eutrofieringskontroll

I løpet av den siste 10-års periode er det her i landet blitt investert mange milliarder kroner i rensetekniske innretninger, nye ledningssystemer, opprydding i jordbruket osv. Spørsmålet er: har resultatet svart til forventningene med hensyn til forbedringer av forurensningssituasjonen i vannforekomstene?

På bakgrunn av det som er nevnt ovenfor er det klart at der en effektiv reduksjon av fosfortilførselen har vært mulig er eutrofieringen reversert. Utviklingen i Mjøsa og Gjersjøen viser dette. Men i mange tilfeller, f.eks. i intensive jordbruksområder (Jæren) og tettbygde områder (Kolbotnvatn, Vansjø osv.) har iverksettelsen av effektive forurensningsbegrensende tiltak ikke svart til forventningene. Dette skyldes i vesentlig grad utette ledningssystemer, diffuse tilførsler, overflateavrenning osv. samt stor fosfortilførsel fra sedimentene.

Tiltakene som hittil er utført, har vært rettet mot hva man har ment var teknisk mulig. Vanligvis er tekniske løsninger bestemt ut fra avløpsvannets mengde og sammensetning, mens kunnskap om resipientens økologiske tilstand sjelden er lagt til grunn for slike vurderinger.

Selv om det på mange felt fortsatt er stor mangel på viten, er kunnskapsgrunnlaget i dag langt større enn tidligere. Dette ved siden av de store omkostninger

med omfattende rensetiltak, gjør at man med større presisjon enn tidligere må kunne bedømme om et visst utslipp under gitte betingelser forårsaker skader eller ikke før tiltaket iverksettes.

En altfor høygradig rensing av kommunalt avløpsvann kan diskuteres når resipienten er et næringsfattig vannsystem hvor en viss næringsstofftilførsel kan være positiv ved f.eks. økt fiskeproduksjon. I sure og forsurende innsjøer er det en markert fosformangel, og mye taler for at en avpasset fosfortilførsel kan motvirke en fortsatt forsurening. Til tross for dette samt kildens beliggenhet i forhold til den aktuelle resipient, har man hatt den samme målsetting når det gjelder rensing av kommunalt utslipp. Her må en oppmykning og større grad av fleksibilitet til.

Kjemisk felling med aluminiumsulfat i tilslutning til forsurede innsjøer er spesielt uheldig. Dette er galt tildels fordi uforbrukte kjemikalier alltid tilføres systemet med økt risiko for aluminiumsforgiftning i surt vann og til dels fordi man kan få en etterfelling i resipienten og følgelig en ytterligere fosforutarming. Dessuten har dette avløpsvannet en lavere bufferkapasitet jevnført med et avløpsvann som felles med f.eks. kalk.

Kost/nytteanalyser på bakgrunn av gode kunnskaper om forholdene i resipienten og en vel fundert målsetting for bruken av den aktuelle vannforekomst bør legges til grunn for type og omfang av forurensningsbegrensende tiltak. Dette vil både faglig og økonomisk gi de beste resultater. En rimelig målsetting må i alle fall være at iverksettelse av forurensningsbegrensende tiltak ikke medfører større miljøskader enn utslipp av urensset avløpsvann.

LITTERATUR

- Berge, D., Rognerud, S. og Johannessen, M.* 1979. Videreutvikling av fosforbelastningsmodeller for store sjiktete innsjøer. NIVA-årbok 1979. pp. 39—42.
- Dillon, P. J. and Rigler, F. H.* 1974. The phosphorus — chlorophyll relationships in lakes. *Limnol. Oceanogr.* 19: 767—772.
- Holtan, H.* 1979. The Lake Mjøsa Story. *Arch. Hydrobiol. Beith.*, 13, 242—258.
- Holtan, H.* 1981. Eutrophication of Lake Mjøsa and its Recovery. *Water Quality Bulletin.* Vol. 6, No 4.
- Sawyer, C. N.*, 1947. Fertilization of lakes by agricultural and urban drainage. *New England Water Works Assoc.* 61: 109—127.
- Vollenweider, R. A.* 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD/DAS/CSI/ 68. 27. Paris.
- Vollenweider, R. A.* 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD/DAS/CSI/ 68. 27. Paris.
- Vollenweider, R. A.* 1975. Input — output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweitz. Z. Hydrol.* 37: 53—84.
- Vollenweider, R. A.* 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ict. Ital. Idrobiol* 33: 53—83.
- Vollenweider, R. A.* 1981. Eutrophication: A Global Problem. *Water Quality Bulletin* Vol 6, No 3.
- Vollenweider, R. A. and Dillon, P. J.* 1974. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research. NRCC Report No. 13690.