

Eutrofiering i store innsjøer

Av Johannes Kjensmo.

Johannes Kjensmo er professor i limnologi ved
Institutt for marinbiologi og limnologi,
Avdeling for limnologi, Universitetet i Oslo.

*Foredrag holdt på Seminar i
Norsk Forening for Vassdragspleie
og Vannhygiene 5. september 1977.*

I moderne limnologi brukes betegnelsen eutrof (næringsrik) om en innsjø som har rik tilførsel av plantenæringsalter til sine vannmasser, og det er i særlig grad tilførselen av fosfor- og nitrogenforbindelser som er avgjørende i denne sammenheng. Trofigraden er primært bestemt av konsentrasjonen av næringsalter per volumenhet vann. Dette innebærer at to innsjøer som ligger under samme naturlige betingelser, kan ha forskjellig trofigrad hvis størrelsen av deres vannvolum eller mer presist, deres middeldyp, er vesentlig forskjellige. Årsaken til dette vil framgå av de betraktninger som nedenfor blir gjort om den naturlige eutrofieringsprosess.

Med eutrofiering menes i det følgende en øket tilførsel av næringsalter samt effekten av denne økning. Primært består effekten i øket plantevekst, og denne medfører videre en øket produksjon i alle ledd i innsjøens organismeresamfunn. Økningen i tilførsel av næringsalter til en innsjø vannmasser kan være naturlig betinget, eller den kan være forårsaket av menneskers aktivitet i innsjøens nedslagsfelt. Vi skiller klart mellom disse former,

og vi betegner dem som henholdsvis naturlig og påtvunget eutrofiering.

En naturlig eutrofiering er primært et resultat av en innsjøens evne til å akkumulere næringsalter. Tallrike eksempler på undersøkelser av næringsaltsbudsjetter viser at tilførselen av slike salter nesten alltid overskrider den mengde som gjennom avløp etc., går ut av innsjøen. Akkumulasjon i innsjøsedimentene vil utgjøre en stor del av differensen. Den akkumulerte del må ikke betraktes som uvesentlig for innsjøens vannmasser, da det foregår en viss utveksling av salter mellom sediment og vann. Hvis denne utveksling fører til en nettoavgivelse av næringsalter fra sedimentene, vil den kunne utgjøre en vesentlig kilde i eutrofierringssammenheng. Det er denne interne tilførsel av næringsalter som danner hovedgrunnlaget for en naturlig eutrofiering. Som vist av Mortimer (1941-42), vil graden av tilbakeførsel av f.eks. fosfat fra sediment til vann avhenge av redokspotensialet i sedimentoverflaten. Under anaerobe forhold i dypvannet, kan redokspotensialet bli så lavt at ferrikomplekser i sedimentoverflaten reduseres. Dette vil fjerne den barriere som en oksydert slamoverflate representerer, og avgivelsen av fosfat fra sediment til vann kan foregå uhindret. Den økning i konsentrasjon av

næringssalter i en innsjøs vannmasser, som er forårsaket av denne prosess, vil i stor utstrekning være bestemt av innsjøens totale vannvolum sett i relasjon til utstrekningen av kontaktflaten sediment/vann. Den naturlige eutrofiering, som er en meget langsom prosess, berører derfor fortrinnsvis grunne innsjøer i naturlige næringsrike områder. Under stabile klimatiske forhold er den naturlige eutrofiering, grunnet sin karakter, en irreversibel prosess.

Det skal her presiseres at uttrykket «eutrofiering i store innsjøer» i det følgende skal oppfattes som eutrofiering i dype innsjøer, eller enda mer presist, eutrofiering i innsjøer som har relativt store middeldyp.

Når et betydelig antall store innsjøer rundt i verden har gjennomgått, og stadig gjennomgår, en sterk eutrofieringsprosess, skyldes dette menneskers aktivitet. Det er ganske utenkelig at store, oligotrofe (næringsfattige) innsjøer vil være gjenstand for en naturlig eutrofiering. De store vannvolum som er typiske for slike innsjøer, er en av årsakene til dette. Store middeldyp medfører at kontaktflaten sediment/vann blir liten i forhold til vannvolum. I innsjøer med store middeldyp vil dessuten nedbrytningen i de frie vannmasser av nedsynkende organisk materiale bli større enn i grunne innsjøer. Selv om nedbrytningshastigheten i hypolimnion er nedsatt på grunn av lave temperaturer i store innsjøer, vil den lange oppholdstiden i vannet resultere i at sedimentenes akkumulasjon av de næringssalter som er bundet til organisk materiale, blir mindre her enn i grunne innsjøer.

Hovedkilden for tilførsel av næringssalter til de eutrofierte store innsjøer er

avløpsvann fra byer og tettsteder, samt tilførsel fra jordbruk og bioindustri.

I motsetning til en naturlig eutrofieringsprosess, er en påtvunget eutrofiering reversibel, — i det minste til en viss grad. Tiltak som er utført for å bekjempe eutrofiering i store innsjøer f.eks. i Sveits og ikke minst, i Lake Washington i USA, viser riktigheten av denne påstanden. Med Lake Washington som eksempel, skal det i det følgende vises noen av hovedprinsippene for eutrofiering i store innsjøer. Alle data som nyttes, er tatt fra Edmondson (1969, 1970, 1972, 1977).

Lake Washington har et overflateareal på 128 km². Innsjøen som ligger innenfor bygrensene til Seattle i staten Washington, har et maksimumsdyp på 65 m, og middeldypet er 18 m.

I midten av 1950-tallet viste innsjøen velkjente tegn på en sterk eutrofiering. I 1955 oppstod blomstring av *Oscillatoria rubescens* og andre blågrønne alger, og det var følgelig tydelige tegn på at hele næringskjeden i innsjøen var i ubalanse. En hovedkilde for tilførselen av plante-næringssalter var avløpsvann fra forsteder til Seattle. Alt dette avløpsvannet gjennomgikk rensing for fjerning av organisk materiale, men det ble ikke foretatt noen form for kjemisk rensing av avløpsvannet. I 1957 mottok innsjøen 49 900 kg, eller 56% av sin totale fosfortilførsel, fra denne kilde. I perioden 1957—1963 økte den totale fosforkonsentrasjonen i innsjøen med en faktor på 2,71. Denne økning kunne ikke tilskrives økning i folketallet over samme periode, men perioden representerer et tidsintervall da bruken av fosforholdige vaskemidler økte sterkt. Dette framgår med all ønskelig tydelighet også fra undersøkelser av andre store innsjøer i USA, se Fig. 1. I følge Edmondson (1972) utgjorde økningen i

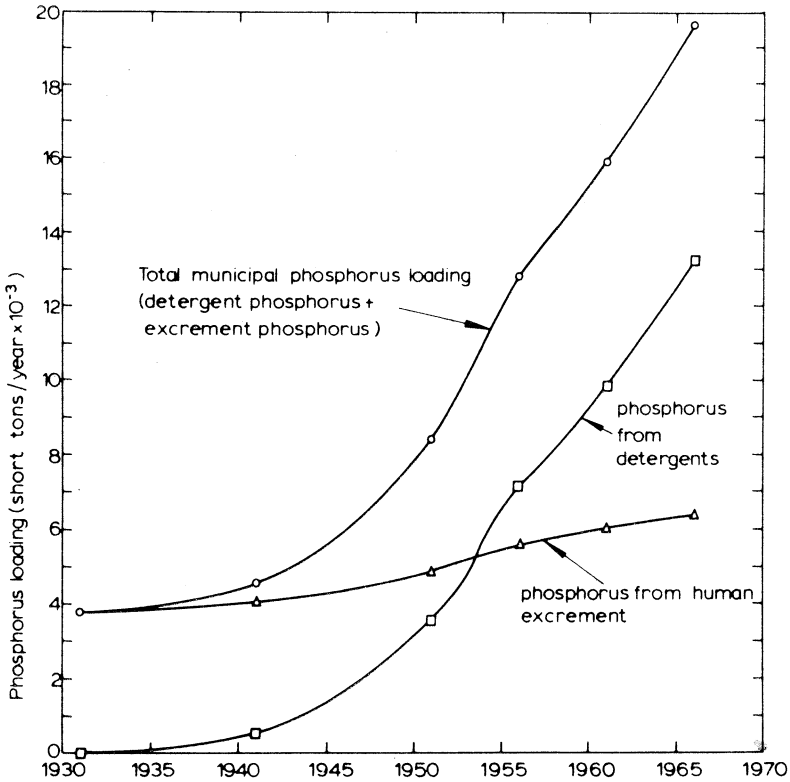


Fig. 1. Variasjoner i to fraksjoner av totalfosfor i kloakktilførsel til Lake Erie, USA. (Fra Burns og Ross 1972).

totalt fosforutslipp til Lake Washington fra seks av rensenanleggene 76 200 kg i perioden 1957—1964. I 1964 var det årlige tilskuddet fra disse seks rensenanlegg 103 900 kg totalfosfor.

Fig. 2 viser sommersituasjonen i epilimnion i Lake Washington i 1963. Epilimnion svarte da til de øverste 10 m av vannmassene. Fosfatverdiene i vintermånedene er gjennomsnittsverdier for hele vannmassen. Denne gjennomsnittsverdi, såvel som gjennomsnittsverdiene av andre

næringsalter, danner grunnlaget for primærproduksjonen i epilimnion når innsjøen går inn i sommerstagnasjonen. Næringssaltene i hypolimnion blir da, på grunn av den termiske stabilitet, utilgjengelig for produksjon i epilimnion. Ved en gitt belastning, vil de nevnte gjennomsnittsverdier være bestemt av det totale vannvolum, og verdiene vil avta med økende middeldyp. Ved en gitt belastning vil derfor virkningen (primærproduksjonen) bli mindre desto større en innsjø vannvolum er. Fig. 2 viser at

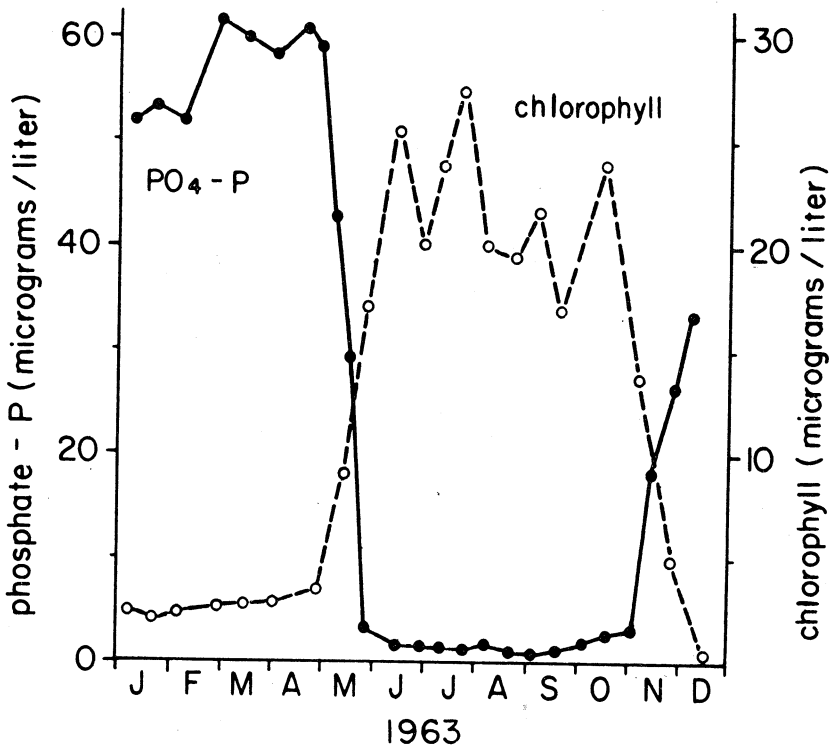


Fig. 2. Variasjoner i $PO_4\text{-P}$ og fytoplanktonbiomasse (klorofyll) i epilimnion i Lake Washington i 1963. (Diagram fra Vallentyne 1974).

fosfatkonsentrasjonen i epilimnion i Lake Washington avtok raskt da innsjøen ble termisk skiktet, og økningen i fytoplanktonbiomassen, i Fig. 2 uttrykt som klorofyllinnhold, viser at fosfatet medgikk til primærproduksjonen. At denne produksjonen holdt seg på et høgt nivå gjennom hele sommeren, skyldtes dels den organiske omsetning i de frie vannmasser — dvs. en resirkulering av næringssaltene, dels skyldtes det en kontinuerlig ekstern tilførsel av næringssalter. Betydningen av kloakkutslipp til epilimnion som en vesentlig faktor for å opprettholde en stor primærproduksjon gjennom sommerstag-

nasjonen, er påvist spesielt klart av Thomas (1969) for Zürichsjøen i Sveits. Det må her tilføyes at stor tilførsel av næringsfattig vann til epilimnion i en innsjø, vil bidra med en fortynnings-effekt om sommeren, og dette vil føre til en lavere primærproduksjon.

I årene 1963—1968 ble 99% av kloakktilførselen til Lake Washington stoppet, dvs. den ble ved hjelp av avskjærende ledninger ført bort.

Resultatet framgår av Fig. 3. 100% verdiene i diagrammet er for nærings-salter gjennomsnittsverdier for vinteren 1963. For klorofyll (biomasse) er 100%

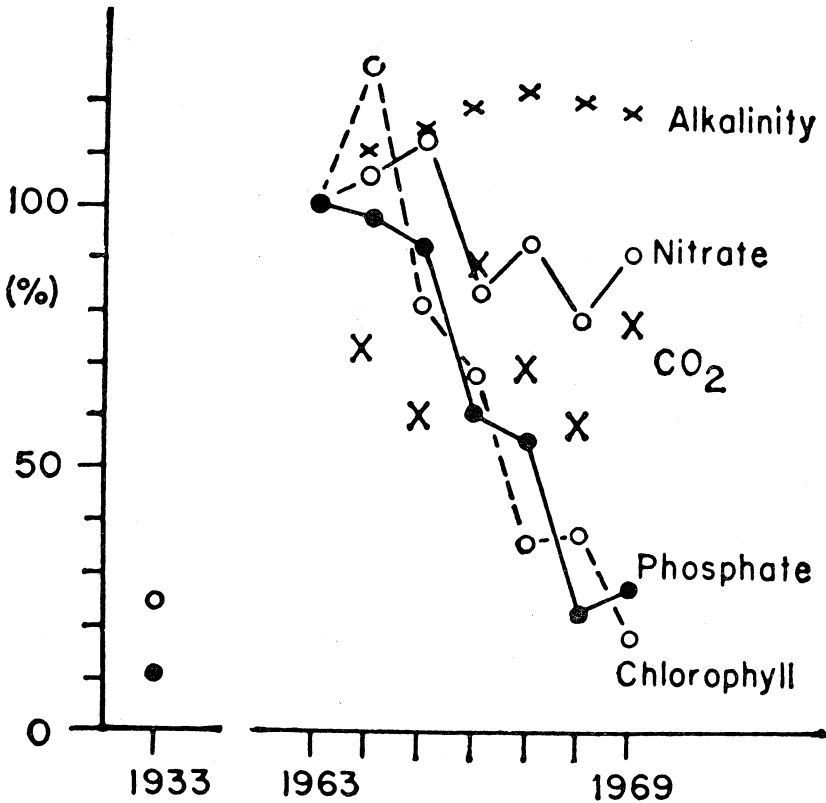


Fig. 3. Midlere vinterverdier (Januar — April) av fosfatfosfor, nitratnitrogen, og midlere sommerverdier av klorofyllinnhold (Juli — August) i fytoplankton i epilimnion av Lake Washington. Punkter for midlere vinterverdier av alkalinitet og CO₂ er avmerket i diagrammet. Verdiene for 1963 er merket av som 100%. (Fra Edmondson 1970).

verdien lik gjennomsnittsverdien for sommeren 1963. I 1963 ble kloakktilførselen redusert med 25%, og i 1965 med 50% av det opprinnelige volum. I 1968 var 99% av det opprinnelige volum ledet vekk. Som det framgår av Fig. 3, viser sommermiddelverdiene for biomassen av fytoplankton et nærmest parallelt avtak med avtaket i vintermiddelverdiene for fosfat. I 1970 var begge disse verdier av samme størrelsesorden som i 1950. Det

er vesentlig å merke seg at innsjøen reagerte positivt allerede etter 1963 da bare 25% av kloakken ble fjernet. Det skal her tilføyes at fosfat var den eneste faktor som det kunne påvises en slik parallell endring med biomassen for. Som diagrammet viser, kan umulig nitrat eller CO₂ ha forårsaket reduksjonen i fytoplanktonbiomassen. Sammen med fosfat er som kjent, nitrogenforbindelser og CO₂ ofte blitt betraktet som mulige minimums-

faktorer for primærproduksjonen. Nyere undersøkelser tyder forøvrig på at rollen til CO₂ som minimumsfaktor er sterkt overdrevet. Diffusjon av CO₂ gjennom overflaten i en innsjø synes i mange tilfeller å være tilstrekkelig til å opprettholde primærproduksjonen (Schindler 1974).

Avtaket i konsentrasjonen av næringsalter i den trofogene sone, eller bedre, i epilimnion av en stor innsjø, vil gjennom et slikt inngrep som er beskrevet for Lake Washington, bli raskere og mer effektivt desto større gjennomstrømningen av næringsfattig vann er. Stor gjennomstrømning av næringsfattig vann vil med andre ord føre til en hurtigere reduksjon i fytoplanktonbiomassen under sommerstagnasjonen. Den teoretiske fornyelsen av Lake Washington er ca. 3 år, men fornyelsen av epilimnion er selvsagt raskere da gjennomstrømningen om sommeren nettopp foregår i epilimnion.

De lange høst- og vintersirkulasjonsperioder som, grunnet vannets store varmekapasitet, er karakteristisk for mange store innsjøer, er også en vesentlig faktor for fortykning av næringsaltkonsentrasjonen. Dette forhold har full gyldighet for innsjøer i den tempererte sone, og det utgjør en viktig faktor i eutrofieringssammenheng i Norge f.eks. Under andre klimatiske forhold, hvor stagnasjonsforholdene for dypvannet kan bli meget lange, vil situasjonen kunne bli en helt annen. Undersøkelser av eutrofiering i de store italienske innsjøer viser hvordan lange stagnasjonsperioder kan medføre dannelse av meromiktisk stabilitet, dvs. en tilstand der dypvannet på grunn av saltanrikning blir permanent stagnerende. Vollenweider (1964) påviste en slik utvikling særlig for Lago di Lugano. De store italienske innsjøer har

fullsirkulasjon bare om vinteren. Vinteravkjølingen er langsom i det aktuelle området, og på grunn av tidlig sommeroppvarming, utelir denne fullsirkulasjon enkelte år. Stagnasjonsperioden for dypvannet blir dermed meget lang. Den økede nedbrytning av organisk materiale i dypet, som er en direkte følge av påtvunget eutrofiering, vil dermed forandre dypvannets kjemiske miljø og føre til permanent stagnasjon. Dypvannet i slike innsjøer vil senere fungere som feller eller sparebøsser for næringsalter.

Sedimentenes rolle som kilde for næringsalter, dvs. den interne tilførsel som er tillagt avgjørende vekt ved naturlig eutrofiering, synes å være av underordnet betydning for eutrofierte store innsjøer. I Lake Washington f.eks. har Edmondson (1977) gjennom paleolimnologiske undersøkelser vist at sedimentene ble sterkt anrikt på fosfor gjennom eutrofieringsfasen. Denne fosforanrikning skyldtes sedimentasjon av plankton. Dette sedimenterte fosfor er altså blitt værende i sedimentene, dette til tross for at middeldypet i Lake Washington er bare 18 m. Bodensee representerer et annet eksempel på hvordan sedimentene i en stor, sterkt eutrofiert innsjø virker som fosfordepot (Kiefer 1972). Bodensee-Obersee har et middeldyp på 100 m, og innsjøen har normalt fullsirkulasjon høst og vinter. De oksygenmengder som befinner seg i den volummessig store hypolimnion ved sommerstagnasjonens begynnelse, kan oksydere betydelige mengder organisk materiale uten at det oppstår anaerobe forhold i dypvannet. Dette er en egenskap hos store innsjøer som klart skiller dem fra mindre, grunne lokaliteter. Nyere undersøkelser tyder på at betydningen av fosfatavgivelse fra sedimentene kan være overdrevet endog for grunne

eutrofierte innsjøer som har lange perioder med anaerobe forhold i dypet (Lee 1977; Schindler et. al. 1977).

Det resultat som er oppnådd i Lake Washington, viser at det kan nytte å bekjempe en påtvunget eutrofiering i store innsjøer. Det skal tilføyes at det nevnte resultat skyldtes den amerikanske limnolog W. T. Edmondson's entusiastiske og ukonvensjonelle innsats. Takket være Edmondson's tilbakevisning av de tradisjonelle og velkjente motargumenter som alltid framkommer i forbindelse med tiltak for å rette opp en eutrofierings situasjon, er idag Lake Washington en innsjø som

er til glede og nytte, — og ikke til sjenanse, for sine omgivelser.

Et velkjent argument i eutrofieringsdiskusjoner er at andre faktorer enn fosfor kan være begrensende for primærproduksjonen. Men fosfor fortjener under alle omstendigheter spesiell oppmerksomhet. Selv om fosfor påviselig ikke er begrensende i en bestemt eutrofierings situasjon, kan nettopp dette stoff gjennom kjemisk felling bringes ned i konsentrasjoner som gjør det til begrensende faktor. Fosfor inntar i så måte en særstilling, da det er det eneste essensielle plantenæringsstoff som på denne måte kan gjøres til minimumsfaktor.

LITTERATUR

- Burns, N. M. og Ross, C., 1972: Oxygen-nutrient relationships within the central basin of Lake Erie. I N. M. Burns and C. Ross (Red.): Project Hypo. Canada Centre for Inland Waters, Paper No. 6. — Burlington, Ont.
- Edmondson, W. T., 1969: Cultural eutrophication with special reference to Lake Washington. — Mitt. int. Ver. Limnol. 17.
- 1970: Phosphorus, nitrogen, and algae in Lake Washington after diversion of sewage. — Science 169.
- 1972: The present condition of Lake Washington. — Verh. int. Ver. Limnol. 18.
- 1977: Formation of recent laminations in sediment of Lake Washington. — S.I.L. XX Congress, Copenhagen 1977 — Abstracts.
- Kiefer, F., 1972: Naturkunde des Bondensees. Jan Thorbecke Verlag — Sigmaringen.
- Lee, G. F., 1977: Significance of oxic vs anoxic conditions for Lake Mendota sediment phosphorus release. I H. L. Golterman (Red.): Interactions between sediments and fresh water. — Dr. W. Junk B. V. Publ. — Haag.
- Mortimer, C. H., 1941—42: The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. — J. Ecol. 29 og 30.
- Schindler, D. W., 1974: Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management. — Science 184.
- Schindler, D. W., Hesslein, R. og Kipphut, G., 1977: Interactions between sediments and overlying waters in an experimentally lake. I H. L. Golterman (Red.): Interactions between sediments and fresh water. — Dr. W. Junk B. V. Publ. — Haag.
- Thomas, E. A., 1969: The process of eutrophication in Central European lakes. I Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives. — National Acad. Sci. — Washington, D. C.
- Vallentyne, J. R., 1974: The algal bowl: lakes and man. — Fish. Res. Board Can. Misc. Spec. Publ. 22.
- Vollenweider, R. A. 1964: Über obligomiktische Verhältnisse des Lago Maggiore und einiger anderer insubrischer Seen. — Mem. Ist. Ital. Irobiol. 17.