

KVÄVE ELLER FOSFOR – VAD ÄR BEGRÄNSANDE NÄRSALT I KUSTOMRÅDEN? EXEMPEL FRÅN NORSKA FJORDAR

Nitrogen or Phosphorus – what is Limiting Nutrient in Coastal Areas? Examples from Norwegian Fjords

av *TORSTEN KÄLLQVIST*, *Norsk Institutt for Vannforskning, Boks 33, Blindern, N-0313 Oslo 3, Norway*

Abstract

The dominating role of phosphorus as limiting nutrient in fresh water is well documented, while the situation in coastal areas and the open sea is less clear. In the marine environment phosphorus (P) and nitrogen (N) availability appears to be more balanced to the nutrient requirements of algae. When nutrient limitation is discussed, it is necessary to distinguish between limitation of the algal growth rate and limitation of the biomass production in a system. It is the nutrient limitation of potential biomass production that should be of concern when measures against eutrophication are planned. The potential biomass production is determined by the availability of nutrients, which in turn depends on physical transport and biological transformations. Examples from Norwegian fjords show an increasing tendency of P-limitation with decreasing salinity which may be ascribed to the high N/P-ratio in land runoff. This motivates the use of phosphorus removal in wastewaters discharged into fjords influenced by fresh water. The need for P- or N-removal may, however, be judged differently in a local and in a regional perspective. The situation in the fjords suggests that denitrification may be of lesser significance in deep fjords than in shallow coastal areas like in the Kattegat and the Baltic Sea.

Sammanfattning

Fosfors dominande roll som begränsande närsalt i sötvatten är väl dokumenterad. I hav och kustområden är emellertid situationen mindre klar. Här är tillgången på fosfor (P) och kväve (N) mer balanserad i förhållande till algernas näringskrav och båda kan tänkas bli begränsande. Det är nödvändigt att skilja mellan näringsbegränsning av algernas växthastighet och näringsbegränsning av biomassaproduktionen i ett system. Den sista betydelsen av begreppet är mest intressant i den praktiska hanteringen av eutrofieringsproblemen. Den potentiella biomassaproduktionen bestäms av tillgången på näring i förhållande till algernas behov. Tillgången av N och P påverkas av fysiska transporter och biologiska processer. Exempel från norska fjordar visar en ökande tendens till P-begränsning med minskande salthalt. Detta kan förklaras med det högre N/P-förhållandet i sötvatten. Fosforreduktion i avloppsvatten som släpps ut i sötvattenspåverkade fjordar är därför motiverad. Behovet av P- eller N-rening kan emellertid vara olika i ett lokalt och ett regionalt perspektiv. Förhållandena i norska fjordar kan tyda på att denitrifiering är av mindre betydelse för kvävebudgeten i dessa än i grunda kustområden som t ex i Kattegat och Östersjön.

Bakgrund

Fosfors dominande roll som begränsande närsalt i sjöar är numera allmänt accepterad men först efter en debatt som kulminerade för nästan 20 år sedan. Ett viktigt resultat av det vetenskapliga arbetet som då initierades för att lösa problemen med eutrofieringen av sjöar och vattendrag är utvecklingen av empiriska fosforbelastningsmodeller. Mest känd är den sk Vollenweidermodellen, som beskriver eutrofieringsgrad (som klorofyllinnehåll) som funktion av fosforbelastning (normaliserad med avseende på medeldjup

och uppehållstid) i sjöar (Vollenweider 1976). Utprovning av Vollenweiders modell på ett stort antal sjöar med olika klimatiska, morfologiska och biologiska förhållanden tyder på ett universellt samband mellan fosforbelastning och den algiomassa som utvecklas (Jones och Lee 1986). Modellen har blivit ett nyttigt redskap för att fatta beslut om nödvändiga åtgärder mot eutrofiering i sjöar.

Den variation i respons på en bestämd fosforbelastning som ändå kan observeras i olika sjöar är förmodligen i första hand ett resultat av skillnader i biologisk struktur. Fiskens inverkan på planktonsammansätt-

ningen och vattenkvaliteten har beskrivits av Andersson et al. (1978). Detta förhållande kan ge möjligheter att påverka eutrofieringssituationen i sjöar genom manipuleringar av den biologiska strukturen så att betningstrycket på algerna ökar. Goda resultat av att styra eutrofieringen genom att manipulera fiskbestånd i sjöar har uppnåtts bl a inom ett program för eutrofieringsforskning i Norge (Olsen och Reinertsen 1986). Betydelsen av zooplanktonets betning på algsamhällets biomassa och artsammansättning har påvisats också i marina system (se t ex Ryther och Sanders 1980, Huntley 1982, Frost 1987).

Orsaken till det påfallande klara sambandet mellan fosforbelastning och algbiomassa i sjöar framgår tydligt vid en jämförelse av sammansättningen av algernas cellmaterial och innehållet av salter i vanligt sjövattnet. Om man tänker sig att alger utvecklas i en avgränsad vattenmassa är det fosfor (P) som sätter taket för den algbiomassa som produceras. Tillför man mer P är det i stället kväve (N) som blir begränsande för algproduktionen. Algernas innehåll av olika mineral är visserligen inte konstant, men under en bestämd gräns kan algerna inte längre växa. Minimumkraven för P och N tyder på att ett N/P-förhållande < 5 på viktbasis ger N-begränsning medan $N/P > 10$ ger P-begränsning av den algbiomassa som kan produceras (se t ex Chiaudani och Vighi 1974). I sjöar är N/P-förhållandet ofta 20 eller mer, och P-begränsning är därmed att vänta.

I hav och kustområden är situationen när det gäller begränsande närsalter mindre klar. I motsättning till i de flesta sjöar är N/P-förhållandet i havsvattnet mycket nära det som motsvarar algernas näringskrav. Redfield (1963) konstaterade att förhållandet N/P i marint plankton i genomsnitt var 16/1 på atombasis, som motsvarar 7/1 på viktbasis. Ungefär samma förhållande finner man i oceaniskt havsvatten. Att fastställa vilket av de två närsalterna som är begränsande kräver därför en mer ingående insikt i de faktorer som begränsar utvecklingen av alger än vad som varit nödvändigt för den praktiska hanteringen av sötvattenseutrofiering.

Olika syn på näringsbegränsning i hav och kustområden har hävdats, men efter en artikel av Ryther och Dunstan (1971) i Science tycks teorin om N som den dominerande begränsande faktorn vara förhärskande.

Vad menas med näringsbegränsning?

Orsakerna till de delade meningarna om näringsbegränsning beror troligen delvis på en viss begreppsförvirring. Begränsande näring är nämligen inte ett entydigt begrepp. Det är nödvändigt att skilja på vad som i ögonblicket begränsar algernas växthastighet (kinetisk näringsbegränsning) och vad som är poten-

tiellt begränsande för den biomassa som kan produceras.

Innebörden av biomassabegränsning kan lättast belysas av situationen under en vårblomning i en tät-hetsskiktad vattenmassa. Före vårblomningen innehåller ytvattnet rikligt med närsalter. När ljusförhållandena tillåter det börjar algerna växa. Därmed töms vattnet gradvis på dessa salter, och till slut stagnerar algbiomassan på grund av näringsbegränsning. En stor del av den producerade algbiomassan med sitt innehåll av närsalter försvinner från ytvattensskiktet genom sedimentering genom språngskiktet.

Betydelsen av kinetisk näringsbegränsning kan exemplifieras av den situation som oftast råder i ytvattnet efter vårblomningen. Då gör sig zooplanktonet mer gällande och utövar ett betydande betningstryck på algpopulationen, som därmed hela tiden decimeras. En stor del av närsalterna frigöres därmed över språngskiktet och blir på nytt tillgängliga för algväxt. På detta sätt kan det utvecklas en jämvikt, där närsalterna ständigt recirkuleras. Sedimenteringen av alger genom språngskiktet får mindre betydelse än under vårblomningen (Skjoldal och Wassermann 1986). Den förlust av näring som trots allt sker genom sedimentering av alger och zooplanktonrester kan uppvägas av diffusion upp genom språngskiktet och annan tillförsel utifrån.

I denna situation bestäms algernas växthastighet av hur snabbt närsalterna kan recirkuleras i systemet. Är recirkuleringen effektiv kan algernas växthastighet vara hög, men utan att biomassan ökar och tillväxten balanseras av zooplanktonets betning. Denna mekanism tycks vara orsaken till att oceaniskt plankton oftast inte visar tecken på näringsbegränsning (Goldman 1986, Frost 1987). Erfarenheterna från kustområden visar att även om inte kinetisk näringsbegränsning föreligger i planktonsamhället kan det biologiska systemet, om näringstillgången ökar, svara med en ökning av planktonbiomassan, eventuellt till dess en ny jämvikt inträffar. Det kan med andra ord vara berättigat att tala om potentiellt biomassabegränsande närsalter även om kinetisk näringsbegränsning inte kan påvisas.

Från en praktisk synpunkt är det den potentiella biomassabegränsningen som har störst betydelse. De negativa effekterna av eutrofiering är först och främst ett resultat av stora algbiomassor, som ger grumling av ytvattnet och syreförbrukning på bottenarna.

Hur kan näringsbegränsning påvisas?

När man skall vidtaga åtgärder mot eutrofiering i kustområden har man behov av att identifiera vilket eller vilka närsalter som är begränsande. Flera olika metoder brukar användas för att skaffa information

för att bedöma näringsbegränsning. Dessa metoder är mer eller mindre relaterade till de olika aspekterna av näringsbegränsning som nämnts ovan.

Tillförselberäkningar

Potentialen för utveckling av algbiomassa i ett område är naturligtvis ytterst beroende av hur mycket tillgänglig näring som tillförs. Den mest relevanta informationen för att bedöma näringsbegränsning bör därför vara en fullständig översikt över transporter och processer som påverkar de olika närsalternas tillgänglighet för alger i ytvattensskiktet (Smith 1984). Genom att jämföra den relativa tillgängligheten av N och P med mättningsförhållandet ($N/P=16$ på atombasis) kan man få en uppfattning om vilket närsalt som är potentiellt begränsande. En fullständig kartläggning av näringsflödet är emellertid svår att utföra. Det gäller speciellt för kväve, som har en betydligt mer komplicerad cykel än fosfor. En fullständig budget för kväve måste omfatta de biokemiska processerna denitrifiering och kvävefixering, som bortför respektive tillför tillgängligt kväve.

Närsaltsanalyser

I brist på fullständiga beräkningar av N- och P-flöden måste bedömningar av näringsbegränsning ofta baseras på mindre fullständig information. Mätning av närsaltskoncentrationer i vatten används ofta i det sammanhanget. Vattnets innehåll av N och P (totalinnehåll) avspeglar tillförseln av dessa och ger möjlighet till en grov uppskattning av vad som mest troligt är potentiellt biomassabegränsande i en vattenmassa. Stora avvikelser från Redfield-kvoten indikerar möjlig N- eller P-begränsning. Genom att analysera på specifika närsalter (fosfat, nitrat och ammonium) kan man fastslå om ett närsalt för ögonblicket *inte* är begränsande för algernas växthastighet.

Algväxtpotential

Experimentella undersökningar av algväxtpotential används som ett supplement till närsaltsanalyser för att beskriva näringsförhållandet i vattenprover. AGP-tester (AGP=Algal Growth Potential) kan utföras med naturliga växtplanktonsamhällen eller med testalger från laboratoriekulturer (se t ex Granéli och Sundbäck 1985, Källqvist 1975). Genom att göra AGP-tester med och utan tillsättning av olika närsalter kan man finna vilket eller vilka närsalter som begränsar biomassan av testpopulationen. Metoden har delvis samma begränsningar som kemiska analyser av närsalter i vattnet när det gäller att identifiera växtbegränsande närsalt, men har den fördelen att man kan ta hänsyn till den biologiska tillgängligheten

av närsalter. Dessutom närmar sig metoden problemet näringsbegränsning på ett mer direkt sätt än de kemiska analyserna.

Genom att vattenprovet vid AGP-testerna är avgränsat från omgivningen kan testerna inte ge en realistisk bild av de dynamiska förhållanden som påverkar näringssituationen för den naturliga algpopulationen (Smith 1984). Det innebär att det begränsande närsalt som identifieras med AGP-tester inte behöver vara begränsande för produktionen i det ekosystem som vattenprovet tagits från. AGP-testerna bör vara bäst lämpade till att beskriva förhållandena vid en blomningssituation med liten grad av recirkulering av närsalter, som till exempel vid en vårblomning. På samma sätt som analyser av närsalter kan AGP-tester alltid visa vad som för ögonblicket inte är begränsande för algerna växthastighet i den naturliga populationen.

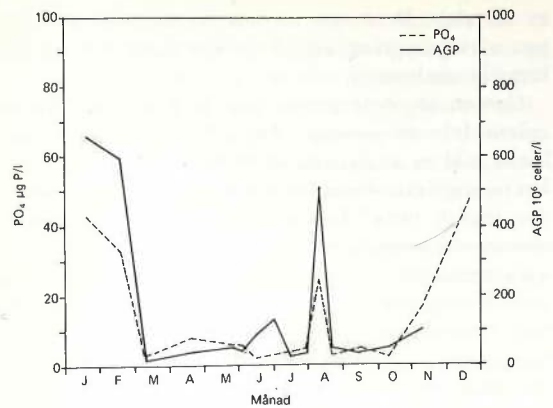
Fotosyntestest

En annan testteknik, som bygger på algernas respons på tillsättning av olika närsalter, är fotosyntestester, där stimulering av assimileringen av ^{14}C används som indikation på näringsbegränsning. Metoden har använts bl a av Goldman (1960) för att påvisa näringsbegränsning i plankton. Senare forskning har emellertid visat att metoden kan ge direkt missvisande resultat på grund av att tillsättning av begränsande närsalt inte ger en omedelbar stimulering av fotosyntesen. I stället kan man ofta registrera en nedgång i fotosyntesen medan näringen tas upp av algerna (Healy 1979, Lean och Pick 1981). Skall man använda fotosyntestester för att identifiera växtbegränsande närsalt måste man därför finna den optimala tidsfördröjningen mellan näringstillättning och mätning av responsen.

Fysiologiska tester

Genom omfattande experimentella undersökningar av algernas reaktion på näringsbegränsning har det blivit möjligt att definiera olika fysiologiska tillstånd som indikerar näringsbegränsning. Några sådana symptom är generella, medan andra är specifika för en bestämd typ av begränsning. Gemensamt för denna grupp av metoder är att de ger information om det naturliga planktonets aktuella näringsstatus. De kan ge svar på om algernas växthastighet vid provtagningstillfället begränsas av något närsalt. Testresultaten ger emellertid inte något direkt svar på frågan om vad som begränsar systemets biomassaproduktion.

Till gruppen fysiologiska tester hör analyser av algernas innehåll av N och P (Sakshaug och Holm-Hansen 1977, Goldman 1986) och analyser av enzymet alkalint fosfatas (Fitzgerald och Nelson 1966, Ralph et al. 1981). Algernas omedelbara respons på



Figur 1. Variationer i cellutbyte vid AGP-tester med *Phaeodactylum tricornutum* och fosfatkoncentration under ett år på en station i Oslofjorden 1981.

näringsstillsättning kan undersökas genom mätning av upptagning av fosfat och ammonium (Vincent 1981 a, b, Chiaudani och Vighi 1976) och bildning av adenosintrifosfat (Olsen et al. 1985).

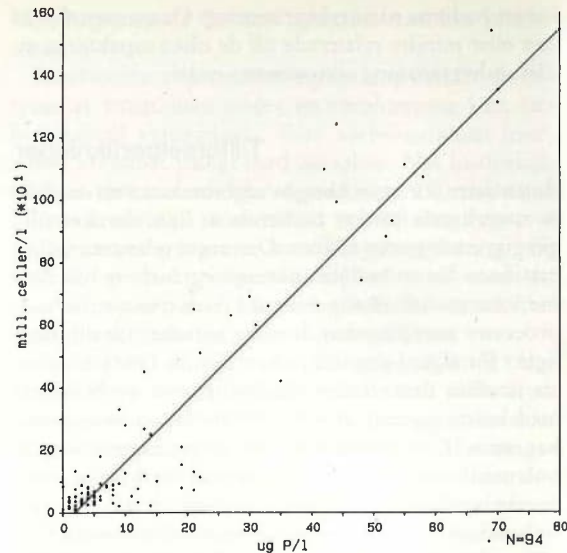
De fysiologiska metoderna har de senaste åren bidragit mycket till förståelsen av naturliga algpopulationers näringsstatus. På grund av fysiologiska skillnader mellan olika alger kräver emellertid de flesta av metoderna att man känner de dominerande algernas respons på näringsbegränsning från laboratorieförsök för att man skall få maximal nytta av informationen från testerna.

Näringsbegränsning i norska fjordar Oslofjorden

Oslofjorden har länge varit präglad av eutrofiering, främst genom det näringstillskott som kommer från bebyggelse i Oslo-området. Utvecklingen av föroreningsituationen har bedrivits av Baalsrud (1987). På 60-talet gjordes en större undersökning av fjorden för att skapa grundlag för åtgärder mot eutrofieringen. Redan då diskuterades behovet av reduktion av tillförseln av N och P. Resultatet av de överväganden som gjordes var att man beslutade införa kemisk rening för att kontrollera P-tillförseln, samtidigt som de flesta av utsläppen skulle samlas till ett centralt reningsverk och ledas ut på intermediärt djup ca 20 km sydväst om Oslo centrum.

Diskussionen om betydelsen av N och P som begränsande närsalter i Oslofjorden har fortsatt även efter att beslutet om reningsverk togs (Paasche 1983, Magnusson 1983). Det har medfört att ytterligare undersökningar om algernas näringsstatus har utförts under de senaste åren.

AGP-tester användes redan på 60-talet för att be-

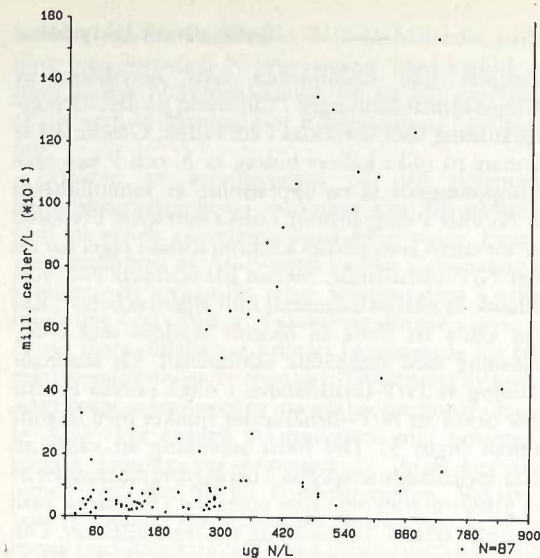


Figur 2. Samband mellan cellutbyte vid AGP-tester med *Phaeodactylum tricornutum* och fosfatkoncentrationen i prover från Oslofjorden 1981. Linjär regression ger sambandet: $AGP = 19,8 \cdot 10^6 \cdot P - 36,8$ ($r = 0,95$, $P \leq 0,001$).

lysa näringsförhållandena i Oslofjorden (Skulberg 1970). Senare har AGP-tester med diatoméen *Phaeodactylum tricornutum* som testalg ingått i övervakningsprogrammet under flera år på 70- och 80-talet. Ytvattnets växtpotential varierar genom året, vilket man kan vänta, med höga nivåer om vintern, följt av en snabb nedgång i samband med vårbloomingen. Om sommaren varierar växtpotentialen runt ganska låga värden, men i allmänhet tyder resultaten på en viss restkoncentration av tillgängliga närsalter. Figur 1 visar en typisk bild av variationerna i växtpotential i ytvattnet under ett år på en station i Oslofjorden. Variationerna i AGP avspeglar variationer i närsalter som i figuren är representerat av fosfatkoncentrationen. Den tillfälliga toppen i AGP i juni orsakades av tillförsel av näringsrikt vatten från större djup i samband med nordlig vind.

Om man jämför växtpotentialen med koncentrationer av närsalter finner man ett tämligen klart samband mellan AGP och fosfat. Detta samband visas i figur 2 för samtliga prover från Oslofjorden under ett år (1981). Nedgången i AGP i samband med vårbloomingen motsvaras av en nedgång i fosfatkoncentration så att förhållandet (ca 20 millioner celler/ $\mu\text{g P}$) håller sig.

Motsvarande framställning av AGP och oorganiska N-komponenter (nitrat och ammonium) visas i figur 3. Också här ser man ett klart samband vid höga AGP-värden, dvs i prover från vintersituationen. Under resten av året är det emellertid inte ovanligt att finna exempel på lågt cellutbyte i förhållande till N-



Figur 3. Samband mellan cellutbyte vid AGP-tester med *Phaeodactylum tricornutum* och koncentrationen av oorganiskt kväve ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4$) i prover från Oslofjorden 1981.

innehållet, särskilt i de mest näringsrika delarna av fjorden.

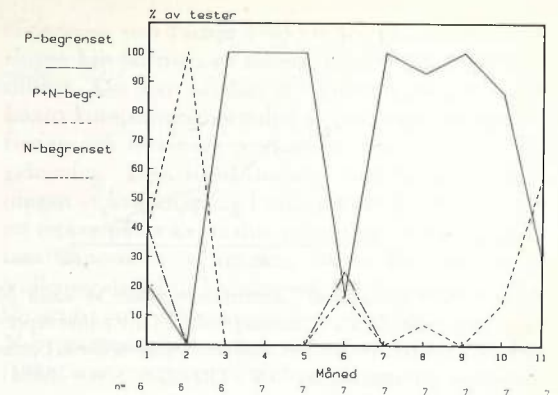
Resultaten av AGP-tester med näringsstillsättning understöder den bild som framkommer vid jämförelse mellan AGP och närsaltskoncentrationer. En sammanställning av vilka närsalter som varit potentiellt begränsande vid AGP-tester under 3 år (1981-1983) visar att P-begränsning dominerar (70 % av proven). Ren N-begränsning registrerades i 12 % och samtidig N och P-begränsning i 17 % av proven (tabell 1).

Resultaten visar alltså på en klar övervikt för P-begränsning. Om man ser på hur de olika formerna för begränsning fördelar sig genom året finner man kvävet betydelse som potentiellt begränsande närsalt är störst under vinterhalvåret, medan fosforbegränsning dominerar om sommaren. Resultaten av tillsättningsförsöken 1981 är sammanställda i figur 4. Den topp i frekvensen av N-begränsning som inträffade i juni har samband med tillförsel av djupvatten med en annorlunda sammansättning av tillgängliga närsalter (jfr figur 1).

De begränsningar som gäller för tolkning av AGP-data nämnda tidigare, har gjort det önskvärt att supplerera AGP-testerna med andra metoder för påvisning av näringsbegränsning i Oslofjorden. Försök med fy-

Tabell 1. Begränsande närsalter vid AGP-tester med *Phaeodactylum tricornutum* i Oslofjorden 1981-1983.

Variabel	P	P+N	N	?	Totalt
Antal prover	139	33	23	2	197
Procent	70	17	12	1	100



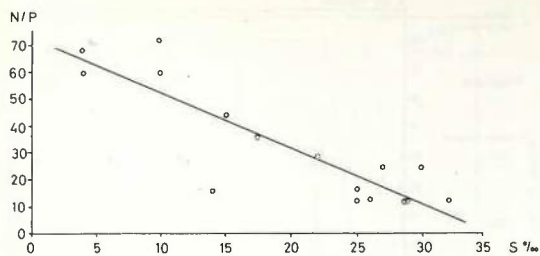
Figur 4. Procentvis fördelning av P, N och P+N-begränsning vid AGP-tester i prover från Oslofjorden 1981. n=antal prover/månad.

siologiska tester har därför gjorts de senaste åren. Det mest omfattande materialet har redovisats av Paasche och medarbetare (1987). Detta omfattar provtagningar på olika stationer i inre Oslofjorden vid 16 tillfällen under 1986. Vid dessa försök gjordes analyser av partikulärt kol (C), N, P, klorofyll och alkalint fosfat. De olika parametrar som undersöktes gav inte alltid ett entydigt svar på vad som begränsade algväxten, men indikationerna på fosforbegränsning var i klar övervikt totalt sett. Klara tecken på N-begränsning registrerades under en period av vårblooming medan P-begränsning dominerade under sommaren och hösten (Paasche et al. 1987).

Näringsupptagningen hos naturligt plankton omedelbart efter tillsättning av fosfat och ammonium har också undersökts vid en serie försök i Oslofjorden. Metoden har föreslagits av Vincent (1981 a, b) för identifiering av växtbegränsande närsalt. Metoden baserar sig på att upptagningen av det begränsande närsaltet är större än för inte begränsande närsalter. Därmed ändras N/P-förhållandet. En ökning av N/P-förhållandet efter 2 timmars inkubering med tillsättning av fosfat och ammonium tas som tecken på N-begränsning, medan en minskning av N/P-förhållandet tyder på P-begränsning. Metoden har den fördelen framför tolkning av N/P-förhållandet utan tillsättning, att den inte kräver kunskap om de aktuella algernas optimala N/P-kvot. Dessutom torde problemet med interferens av detritus vara mindre.

Vincent's näringsbegränsningstest provades först på ett antal algkulturer som tilläts växa till stationär fas i N- eller P-begränsade växtmedia. Resultaten visade att N/P-förhållandet i algerna ökade i alla N-begränsade och minskade i alla P-begränsade kulturer vid 2 timmar inkubering med tillsättning av N och P.

Undersökning av N- och P-upptagning gjordes på 14 planktonprover från Oslofjorden 1986. I alla proverna registrerades en reduktion av N/P-förhållandet

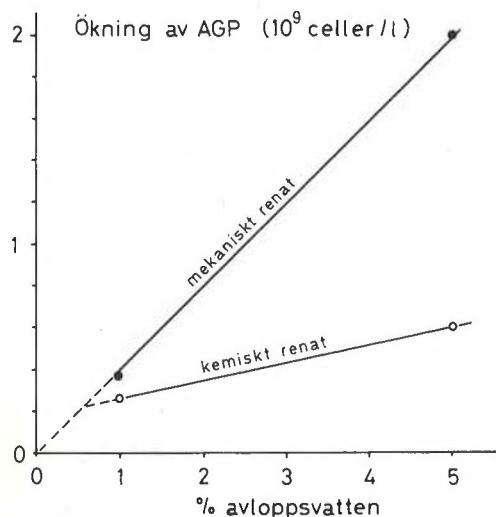


Figur 5. N/P-förhållande (vinterobservationer av totalt N och P) och salthalt (S‰) i norska fjordar. Varje punkt representerar medelvärden av flera observationer i en fjord. Linjär regression ger sambandet: $N/P = 72,2 - 2,05 \cdot S$ ($r = -0,886$).

med mellan 6,5–38 %. Det betyder att upptagningen av fosfor var större än av kväve, vilket enligt Vincent (1981 a, b) är en indikation på P-begränsning. Om man tar hänsyn till osäkerheten i analyserna är det tveksamt om de minsta ändringarna kan tolkas som P-begränsning, men i de flesta fallen torde P-begränsningen vara klar.

De samlade resultaten från undersökningarna i Oslofjorden tyder på att tillförseln av N och P är nära balans i förhållande till algernas krav, men ändå med ett markerat underskott av fosfor under sommarsituationen. Då svarar tillförsel från land med vattendrag och avloppsutsläpp troligen för det största tillskottet av tillgängliga närsalter.

Vid tiden för vårblomningen däremot härrör närsalterna till stor del från de djupare vattenlagren varifrån de har blandats upp i ytvattnet under vintern. Detta kan vara förklaringen till att tendensen till N-begränsning är störst om våren.



Figur 6. Ökning av cellutbyte vid AGP-tester med *Phaeodactylum tricornutum* i N-begränsat havsvatten vid tillsättning av olika koncentrationer mekaniskt och kemiskt renat avloppsvatten.

Salthaltens betydelse

Exemplet från Oslofjorden visar betydelsen av näringssammansättningen i tillförseln på den näringsbegränsning som utvecklas i ett vatten. Genom att se närmare på olika källors bidrag av N och P kan man förhoppningsvis få en uppfattning av sannolikheten för N- eller P-begränsning i olika områden. Eftersom det sötvatten som tillförs kustområdena i regel har ett högt N/P-förhållande, medan havsvattnets N/P-förhållande är nästan balanserat mot algernas behov, kan man vänta att finna en ökande tendens mot P-begränsning med sjunkande salthalt. En sammanställning av N/P-förhållanden i olika norska fjordar visar också att N/P-förhållandet sjunker med ökande salthalt (figur 5). Det finns anledning att vänta att detta förhållande avspeglas i näringsbegränsningen av det plankton som om våren utvecklas i fjordarna, med mest utpräglad P-begränsning vid låga salthalter. Om man utgår från att Redfield-förhållandet (N/P=7/1 på viktbasis) motsvarar balanserad N/P-tillförsel för algväxt, tyder materialet som visas i figur 5 på att P-begränsning skulle göra sig gällande upp mot en salthalt på 30 ‰.

Sambandet mellan salthalt och näringsbegränsning har studerats mer direkt i Trondheimsfjorden (Sakshaug et al. 1983). Med hjälp av fysiologiska parametrar för påvisning av näringsbegränsning har man visat att tendensen till P-begränsning ökar med avtagande salinitet. N/P-förhållandet i naturliga populationer av *Skeletonema costatum* visade till exempel indikationer på P-begränsning ända upp mot en salthalt på 30 ‰.

Observationerna av sambandet mellan salinitet och N/P-förhållanden i norska fjordar tycks stå i kontrast till vad som har rapporterats från Östersjön och Kattegatt, där man menar att kväve är det viktigaste begränsande närsaltet också i områden med ganska låg salthalt (Larsson 1984, Granéli et al. 1986). Anledningen till denna situation i Östersjön tros vara att en avsevärd del av den årliga tillförseln av nitrogen avgår genom denitrifiering (Rönner 1985).

De N/P-förhållanden och den relativt höga frekvensen av P-begränsning som rapporterats från några norska fjordar kan tyda på att denitrifieringen är av mindre betydelse i dessa än i Östersjön. Orsaken till det kan vara att fjordarna i regel är djupa, vilket medför att de har en relativt litet bottenareal över språngskiktet.

Effekten av avloppsvatten

I området som mottar stora tillskott av kommunalt avloppsvatten kommer detta att prägla N/P-förhållandet. I motsättning till övrig avrinning från land har kommunalt avloppsvatten ett lågt N/P-förhållande. I Norge räknar man för närvarande med N/P=6 på viktbasis. Inblandning av avloppsvatten i en recipient

kommer därför att påverka N/P-förhållandet i riktning mot potentiell N-begränsning. Med kemisk rening ändras N/P-förhållandet till ca 50, som alltså skulle verka i riktning mot P-begränsning i recipienten.

Effekten av avloppsvatten på den potentiella näringsbegränsningen i saltvatten kan demonstreras med ett enkelt experiment med AGP-tester. Figur 6 visar resultaten av AGP-tester i olika blandningar av kemiskt och mekaniskt renat avloppsvatten i vatten från yttre Oslofjorden. Tillsättningsförsök visade att N vid detta tillfälle var primärt begränsande för bioproduktionen av testalger. Tillsättning av mekaniskt renat avloppsvatten gav en proportional ökning av AGP. För samma avloppsvatten som genomgått kemisk fällning var ökningen av AGP betydligt mindre vid den högsta koncentrationen. Vid lägre koncentrationer var skillnaden däremot mindre. Kurvorna för ökning av AGP vid tillsättning av kemiskt och mekaniskt renat avloppsvatten tycks skära varandra vid koncentrationen 0,6 %. Detta betyder att vid denna koncentration är N begränsande oavsett reningsmetod, medan P blir begränsande vid högre koncentrationer av kemiskt renat avloppsvatten. I det mekaniskt renade avloppsvattnet råder N-begränsning av AGP vid alla koncentrationer. Resultaten visar att P-reduktion kan vara motiverat också i en recipient som är primärt N-begränsad.

Diskussion

Det material som här har redovisats från norska fjordar tyder på att sannolikheten för P-begränsning ökar med minskande salthalt, och att P-begränsning därför kan väntas förekomma i de flesta sötvattenpåverkade fjordar. De åtgärder som har genomförts för att begränsa utsläppen av fosfor till vattendragen, samtidigt som kväveutsläppen ökar, bör ha bidragit till att öka tendensen till fosforbegränsning i kustområdena. En ökning av N/P-förhållandet har också påvisats i Oslofjorden (Magnusson 1985). Mot denna bakgrund verkar kemisk rening av avloppsvatten vara en motiverad åtgärd för att motverka eutrofieringen i sötvattenpåverkade fjordar.

Behovet för reduktion av N-tillförseln är svårare att hävda. Den minskande tendens till P-begränsning med ökande salinitet som tycks föreligga talar för att N-begränsning främst kan väntas i de yttre kustområdena. I så fall kan man tänka sig att behovet för åtgärder blir olika i ett lokalt och i ett regionalt perspektiv.

En bedömning av behovet och effekterna av en begränsning av N-tillförseln kompliceras av att omfattningen av denitrifiering och kvävefixering är otillräckligt kända. Beräkningar från Östersjön (Rönner 1985) och undersökningar på den amerikanska östkusten

(Seitzinger och Nixon 1985) tyder på att denitrifieringen kan bortföra en avsevärd del av det kväve som tillförs. Det har hävdats att kvävefixeringen skulle kunna kompensera bortfallet av kväve genom denitrifiering och förhindra uppkomsten av reell kvävebegränsning. Den förhållandevis begränsade omfattningen av kvävefixering i världshaven har tolkats som ett tecken på att kväve inte är begränsande för algväxten (Capone och Carpenter 1982). Det faktum att Vollenweiders P-belastningsmodell tycks gälla också för starkt eutrofierade sjöar som visar klara tecken på N-begränsning har också tolkats av Jones och Lee (1986) som ett tecken på att kvävefixering automatiskt kompenserar kvävebehovet så att algbiomassan ändå blir bestämd av P-belastningen. Experimentella undersökningar i marin miljö tyder emellertid på att kvävefixeringen kan begränsas av tillgången på organiska ämnen i vattnet (Pearl et al. 1987).

Genom att företaga näringsbudgeteringar för några olika marina ekosystem kom Smith (1984) fram till att de biokemiska processerna kan justera tillgången på N i ekosystem med lågt hydrografiskt flöde och därmed göra dessa P-begränsade. När de hydrografiska transporterna är betydligt större än de biokemiska flödena av N skulle enligt Smith (1984) andra faktorer än närsalter begränsa ekosystemets produktion. Detta visar att det behövs modeller som beskriver de transportmekanismer och processer som bestämmer tillgången på N och P, för att man skall kunna bedöma behovet och effekten av reducerade kväveutsläpp. Dessa förhållanden är fortfarande otillräckligt kända i norska fjordar och kustområden.

Litteratur

- Andersson, G., Berggren, H., Cronberg, G. & Gelin, C. 1978. Effects of planktivorous and benthivorous fish on organisms and water chemistry. – *Hydrobiologia* 9(1): 9–15.
- Baalsrud, K. 1987. Oslofjordens föroreningsproblem i perspektiv. – *Vann* 22(1): 2–13.
- Capone, D. G. & Carpenter, E. J. 1982. Nitrogen fixation in the marine environment. – *Science* 127: 1140–1142.
- Chiaudani, G. & Vighi, M. 1974. The N:P ratio and tests with *Selenastrum capricornutum* to predict eutrophication in lakes. – *Water Res.* 8: 1063–1069.
- Chiaudani, G. & Vighi, M. 1976. Comparison of different techniques for detecting limiting or surplus nitrogen in batch cultures of *Selenastrum capricornutum*. – *Water Res.* 10: 725–729.
- Fitzgerald, G. P. & Nelson, T. C. 1966. Extractive and enzymatic analyses for limiting or surplus phosphorus in algae. – *J. Phycol.* 2: 32–37.
- Frost, B. W. 1987. Grazing control of phytoplankton stock in the open subarctic Pacific Ocean: a model assessing the role of mesozooplankton, particularly the large calanoid copepods *Neocalanus* spp. – *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 39: 49–68.

- Goldman, J. C. 1960. Primary production and limiting factors in three lakes of the Alaskan peninsula. – *Ecol. Monogr.* 30: 207–230.
- Goldman, J. C. 1986. On phytoplankton growth rates and particulate C:N:P ratios at low light. – *Limnol. Oceanogr.* 31(6): 1358–1363.
- Granéli, E. & Sundbäck, K. 1985. The response of planktonic and microbenthic algal assemblages to nutrient enrichment in shallow coastal waters, Southwest Sweden. – *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 85: 253–268.
- Granéli, E., Granéli, W. & Rydberg, L. 1986. Nutrient limitation at the ecosystem and the phytoplankton community level in the Laholm Bay, south-east Kattegat. – *Ophelia* 26: 181–194.
- Healey, F. P. 1979. Short term responses of nutrient deficient algae to nutrient addition. – *J. Phycol.* 15: 289–299.
- Huntley, M. E. 1982. Yellow water in La Jolla Bay, California, July 1980. II. Suppression of zooplankton grazing. – *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 63: 81–91.
- Jones, R. A. & Lee, G. F. 1986. Eutrophication modeling for water quality management: An update of the Vollenweider-OECD model. – *Water Qual. Bull.* 11 (2): 67–74.
- Källqvist, T. 1975. Algal growth potential of six Norwegian waters receiving primary, secondary and tertiary sewage effluents. – *Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.* 19: 2070–2081.
- Larsson, U. 1984. Östersjön. – I: Rosenberg, R. (red.) *Gödning av havsområden kring Sverige, en kunskapsöversikt*. – Naturvårdsverket Rapport SNV PM 1808: 17–73.
- Lean, D. R. S. & Pick, F. R. 1981. Photosynthetic response of lake phytoplankton to nutrient enrichment: A test for nutrient limitation. – *Limnol. Oceanogr.* 26(6): 1001–1019.
- Magnusson, J. 1983. Nitrogen eller fosforbegrensande algevekst – noe om betydningen av forskjellige faktorer. – *Vann* (3): 311–315.
- Magnusson, J. 1985. Overvåking av forurensningssituasjonen i indre Oslofjord 1984. – Norsk Institutt for Vannforskning 0-71160. 58 s.
- Olsen, Y., Jensen, A. & Reinertsen, H. 1985. ATP changes in P-starved algae as a measure of P-deficiency and the growth rate. – *Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.* 22: 2866–2871.
- Olsen, Y. & Reinertsen, H. (red.) 1986. NTNFS Program for eutfieringsforskning. Slutrapport fase 2, 1983–85. – Norges Teknisk Naturvitenskapelige Forskningsråd. 34 s.
- Paasche, E. 1983. Planktonveksten i fjorder: Styres den av nitrogen eller fosfor? – *Vann* (3): 306–310.
- Paasche, E., Erga, S. R. & Brubak, S. 1987. Nitrogen, fosfor och planktonvekst. En metodundersøkelse i Oslofjorden 1986. – Rapport, Universitetet i Oslo, Botanisk Institutt. 86 s.
- Pearl, H. W., Crocker, K. M. & Prufert, L. E. 1987. Limitation of N-fixation in coastal marine waters: Relative importance of molybdenum, iron, phosphorus, and organic matter availability. – *Limnol. Oceanogr.* 32(3): 525–536.
- Ralph, E., Smith, H. & Kalff, J. 1981. The effect of phosphorus limitation on algal growth rates: evidence from alkaline phosphatase. – *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 38: 1421–1427.
- Redfield, A. C., Ketchum, B. H. & Richards, F. A. 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. – I: Hill, M. N. (ed.). *The Sea Vol. 2*, Interscience: 26–77.
- Ryther, J. H. & Dunstan, W. H. 1971. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in the coastal marine environment. – *Science* 171: 1008–1013.
- Ryther, J. H. & Sanders, J. G. 1980. Experimental evidence of zooplankton control of the species composition and size distribution of marine phytoplankton. – *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 3: 279–283.
- Rönner, U. 1985. Nitrogen transformations in the Baltic proper: Denitrification counteracts eutrophication. – *Ambio* 14(3): 134–138.
- Sakshaug, E. & Holm-Hansen, O. 1977. Chemical composition of *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve and *Pavlova (Monochrysis) lutheri* (Droop) Green as a function of nitrate, phosphate, and iron limited growth. – *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 29: 1: 34.
- Sakshaug, E., Andresen, K., Myklestad, S. & Olsen, Y. 1983. Nutrient status of phytoplankton communities in Norwegian waters (marine, brackish, and fresh) as revealed by their chemical composition. – *J. Plankton Res.* 5(2): 175–196.
- Skjoldal, H. R. & Wassermann, P. 1986. Sedimentation particulate organic matter and silicium during spring and summer in Lindåspollene, Western Norway. – *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 30: 49–63.
- Skulberg, O. M. 1970. The importance of algal cultures for the assessment of the eutrophication of the Oslofjord. – *Helgol. Wiss. Meeresunters.* 20: 111–125.
- Smith, S. V. 1984. Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment. – *Limnol. Oceanogr.* 29(6): 1149–1160.
- Vincent, W. F. 1981a. Rapid physiological assay for nutrient demand by the plankton. I. Nitrogen. – *J. Plankton Res.* 3(4): 685–697.
- Vincent, W. F. 1981b. Rapid physiological assay for nutrient demand by the plankton. II Phosphorus. – *J. Plankton Res.* 3(4): 699–710.
- Vollenweider, R. A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. – *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33: 53–83.
- Seitzinger, S. P. & Nixon, S. W. 1985. Eutrophication and rate of denitrification and N₂O production in coastal marine sediments. – *Limnol. Oceanogr.* 38(6): 1332–1339.