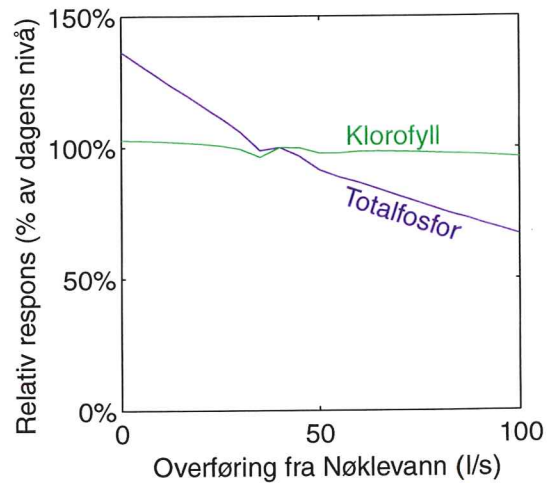
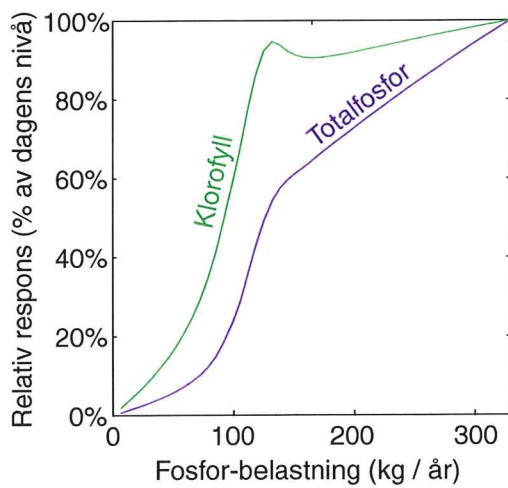


NIVA



RAPPORT LNR 4184-2000

Betydningen av gjennomstrømning for vannkvaliteten i Østensjøvann - en teoretisk vurdering



Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5008 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-NIVA A/S

9015 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

Tittel Betydningen av gjennomstrømning for vannkvaliteten i Østensjøvann – en teoretisk vurdering	Løpenr. (for bestilling) 4184-2000	Dato 01-02-2000
	Prosjektnr. Undernr. O-99138	Sider Pris 25 s.
Forfatter(e) Tom Andersen	Fagområde Eutrofiering, ferskv.	Distribusjon Fri
	Geografisk område Øst-Norge	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Oslo Kommune, Vann- og Avløpsetaten, avd. Avløp og Miljø	Oppdragsreferanse Helene Gabestad
--	--------------------------------------

Sammendrag

Omfattende investeringer i utbedringer av avløpsnett i Østensjøvannets nedbørfelt har gitt betydelige reduksjoner i tilførselene av plantenæringsstoffer, uten at det kan sees noen signifikant forbedring av vannkvaliteten i selve innsjøen. Østensjøvann er fremdeles en av landets mest eutrofierte innsjøer. Det karakteristiske ved dagens situasjon i Østensjøvann er at totalfosfor øker dramatisk gjennom sommersesongen, mest sannsynlig på grunn av en selvforsterkende prosess hvor øking i algemengde gir økt pH, som gir økt utlekking av fosfor fra sedimentene, som igjen gir økt algemengde, osv. Slik sett er totalfosfor i Østensjøvannet vel så mye en funksjon av algemengde som at algemengden er en funksjon av totalfosfor. Modellsimuleringer med forskjellig fosforbelastning og konstant vannføring illustrerer en betydelig bufferevne i forholdet mellom klorofyll og totalfosfor. En 50% reduksjon av fosforbelastningen i forhold til dagens nivå ser ut til gi <10% reduksjon i algemengde, mens en ytterligere reduksjon ned til 30% av dagens nivå synes nødvendig for å oppnå vesentlig bedring i vannkvaliteten. Den samme typen bufferfenomener synes å gjøre seg gjeldende i enda større grad i forhold til gjennomstrømning. Simuleringer med konstant fosforbelastning og varierende gjennomstrømning indikerer at en bør forvente merkbare reduksjoner i totalfosfor, men kun ubetydelige endringer i algemengde med økende vannmengde fra Nøklevann. Noe overraskende indikerer simuleringene at økt gjennomstrømning kan ha større negativ effekt på dyreplanktonet enn på planteplanktonet – først og fremst fordi planteplankton typisk har vesentlig høyere maksimal vekstrate enn dyreplankton. En noe redusert maksimumsverdi i algemengde ledsages derfor av en forlenget periode med algeblomstring, som til sammen medfører en påfallende liten endring i sesongmiddelverdien av klorofyll som funksjon av gjennomstrømning.

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> Eutrofiering Matematisk modell Fosfor Klorofyll 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> Eutrophication Mathematical model Phosphorus Chlorophyll
---	--



Prosjektleder



Anne Lyche Solheim
Forskningsleder



Forskningsjef

**Betydningen av gjennomstrømning for
vannkvaliteten i Østensjøvann – en teoretisk
vurdering**

Forord

Det foreliggende arbeidet har vært utført for Oslo Kommune, Vann- og Avløpsetaten (VAV) som en del av prosjektet "Renere Østensjøvann". I forbindelse med en forestående konsesjonsbehandling av vannoverføringen mellom Nøklevann og Østensjøvann, ønsket VAV en teoretisk vurdering (modellbetraktning) omkring betydningen av gjennomstrømning for vannkvaliteten i Østensjøvann.

Tom Andersen har utført arbeidet på NIVA. Helene Gabestad har vært kontaktperson i VAV.

Oslo, 25/11, 1999

Tom Andersen

Innhold

Sammendrag	5
Innledning	6
Materiale og metoder	6
Bakgrunn og problembeskrivelse	7
Modellbeskrivelse	10
Resultater	15
Simulering av typisk sesongsyklus	16
Simulering av vannkvalitetsforbedrende inngrep	20
Diskusjon	22
Referanser	26

Sammendrag

Omfattende investeringer i utbedringer av avløpsnett i Østensjøvannets nedbørfelt har gitt betydelige reduksjoner i tilførslene av plantenæringsstoffer, uten at det kan sees noen signifikant forbedring av vannkvaliteten i selve innsjøen. Østensjøvann er fremdeles en av landets mest eutrofierte innsjøer. Det karakteristiske ved dagens situasjon i Østensjøvann er at totalfosfor øker dramatisk gjennom sommer-sesongen, mest sannsynlig på grunn av intern gjødsling gjennom en selvforsterkende prosess hvor øking i algemengde gir økt pH, som gir økt utlekking av fosfor fra sedimentene, som igjen gir økt algemengde, osv. Slik sett er totalfosfor i Østensjøvann vel så mye en funksjon av algemengde som at algemengden er en funksjon av totalfosfor.

Det ble laget en enkel matematisk modell for å analysere relasjoner mellom algemengde, fosforbelastning og gjennomstrømning. Modellen har tre tilstandsvariable: totalfosfor, planteplankton (som klorofyll *a*) og dyreplankton. Den siste tilstandsvariabelen viste seg nødvendig for å gjenskape det årvisse avtaket i algemengde allerede i august, når både lys og temperatur fremdeles burde være tilstrekkelig for vedvarende algevekst. Modellsimuleringer med forskjellig fosforbelastning og konstant vannføring illustrerer en betydelig bufferevne i forholdet mellom klorofyll og totalfosfor. En 50% reduksjon av fosforbelastningen i forhold til dagens nivå ser ut til gi <10% reduksjon i algemengde, mens en ytterligere reduksjon ned til 30% av dagens nivå synes nødvendig for å oppnå vesentlig forbedring i vannkvaliteten.

Den samme typen bufferfenomener synes å gjøre seg gjeldende i enda større grad i forhold til gjennomstrømning. Simuleringer med konstant fosforbelastning og varierende gjennomstrømning indikerer at en bør forvente merkbare reduksjoner i totalfosfor, men kun ubetydelige endringer i algemengde med økende vannmengde fra Nøklevann. Noe overraskende indikerer simuleringene at økt gjennomstrømning kan ha større negativ effekt på dyreplanktonet enn på planteplanktonet – først og fremst fordi planteplankton typisk har vesentlig høyere maksimal vekstrate enn dyreplankton. En noe redusert maksimumsverdi i algemengde ledsages derfor av en forlenget periode med algeblomstring, som til sammen medfører en påfallende liten endring i sesongmiddelverdien av klorofyll som funksjon av gjennomstrømning.

Innledning

Omfattende investeringer i utbedringer av avløpsnett i Østensjøvannets nedbørfelt har gitt betydelige reduksjoner i tilførslene av plantenæringsstoffer, uten at det kan sees noen signifikant forbedring av vannkvaliteten i selve innsjøen. I følge NIVAs landsomfattende trofiundersøkelse er Østensjøvann fremdeles en av Norges mest eutrofierte innsjøer. På bakgrunn av dette har Oslo Vann- og Avløpsverk (VAV) satt i gang et forprosjekt "Renere Østensjøvann" med formål å utarbeide en tiltaksplan for bedring av vannkvaliteten i innsjøen.

Fra midten av 1970-tallet er Østensjøvann periodevis blitt tilført vann fra drikkevannsnett for å bedre vannkvaliteten. Etter at Nøklevann ble tatt ut av drikkevannsforsyningen i 1983 har det stort sett vært overført ca 40 l/s på årsbasis til Østensjøvann (med ca ett års avbrudd etter tørkesommeren 1996). NVE har i brev av juli 1997 uttalt at overføringen berører de allmenne interesser i en slik grad at det kreves tillatelse etter Vassdragslovens §§ 104-106 for å gjennomføre tiltaket. I forbindelse med en eventuell konsesjonssøknad har derfor VAV bedt NIVA utrede hvorvidt økt gjennomstrømning ved hjelp av overføring av vann fra Nøklevann kan gi positive effekter på vannkjemi, fisk, alger, bunndyr og vegetasjon i Østensjøvann. Dette er åpenbart en omfattende problemstilling som kan angripes på flere nivå med forskjellig grad av utsagnskraft. I det følgende er det valgt en rent teoretisk angrepsvinkel hvor en søker å formulere en enkel matematisk modell av relasjonene mellom totalfosfor og algemengde i Østensjøvann, og deretter bruker denne modellen til å simulere effekter av forskjellige endringer i både mengde og variasjonsmønster av vanngjennomstrømning.

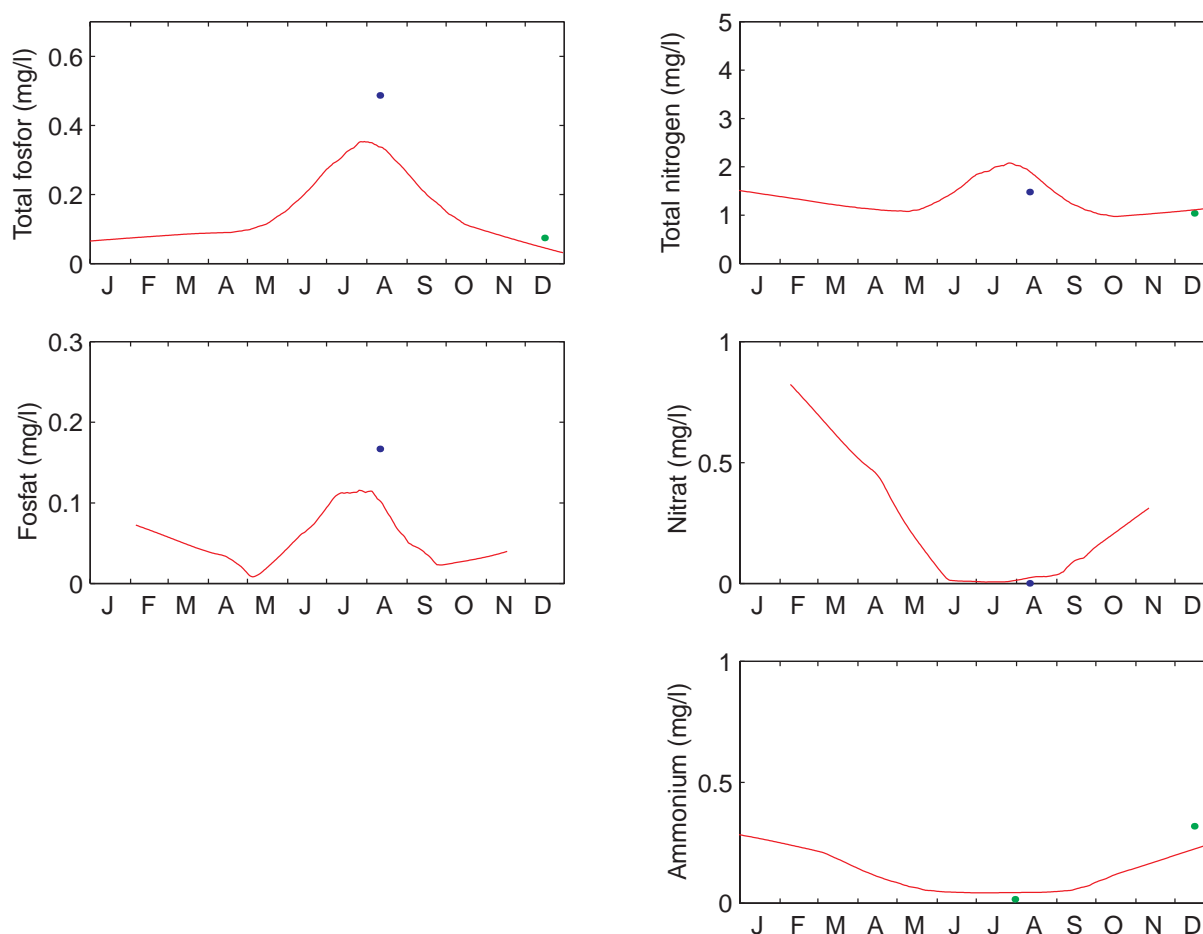
Materiale og metoder

Vannkvalitet i forhold til eutrofieringsproblemer i innsjøer vurderes gjerne på bakgrunn av mengde plantenæringsstoffer i form av totalfosfor og algemengde i form av klorofyll *a*. Tradisjonelle eutrofieringsmodeller av Vollenweider-typen (Vollenweider 1976, Prairie 1989) er gjerne basert på to grunnantagelser: konstant retensjon og konstant vekstutbytte. Konstant retensjon innebærer at en fast andel av fosfortilførselen holdes tilbake i innsjøen og at denne andelen bare er bestemt av fysiske forhold som oppholdstid og middeldyp. Konstant vekstutbytte innebærer et fast mengdeforhold mellom sesongmiddelverdier av totalfosfor og klorofyll, noe som underforstått også innebærer at fosfor er altoverveiende vekstbegrensende faktor. Begge disse grunnantagelsene har antagelig størst holdbarhet i dype og relativt næringsfattige innsjøer. I svært næringsrike innsjøer vil ofte andre begrensingsfaktorer (lys, nitrogen, evt. spormetaller) ha betydning i tillegg til fosfor, slik at antagelsen om konstant vekstutbytte får begrenset gyldighet. I grunne innsjøer vil det også være større grad av utveksling mellom strandsonen, bunnen og de åpne vannmassene slik at sammenhengen mellom tilførsel og permanent tilbakeholdelse (retensjon) blir vesentlig mer kompleks. For en grunn og næringsrik innsjø som Østensjøvannet er det derfor grunn til å forvente at vesentlige avvik fra de klassiske grunnantagelsene faktisk er karakteristiske egenskaper ved selve systemet.

Selv om det eksisterer betydelige mengder måledata fra Østensjøvannet (fra VAV, NIVA og andre kilder), er parameterutvalget i hovedsak begrenset til tradisjonelle vannkvalitetskriterier som totalfosfor og klorofyll *a*. Mangelen på målinger av både prosessrater og biomasser på artsnivå gjør det umulig å ha ambisjoner om noen slags form for fullstendig økosystembeskrivelse. I stedet har vi valgt å konsentrere oss om å representere tradisjonelle vannkvalitetsparametre i en modell som fokuserer på relativt få prosesser, som til gjengjeld antas å være av stor viktighet for Østensjøvannets tilstand i dag.

Bakgrunn og problembeskrivelse

Faafeng (1995), Løvstad & Wold (1995) og Gabestad (1998) har alle gjort omfattende sammenstillinger av tidligere data fra Østensjøvannet. Det finnes rimelig tette observasjoner fra innsjøen over perioden 1979-1999, mens data fra tilløpsbekkene er tilgjengelig fra ca 1982 og fram til i dag. Det er tidligere vist (Gabestad 1998) at det skjedde en betydelig reduksjon i fosfortilførslene til innsjøen i 1984-85, og en litt mindre dramatisk reduksjon i forbindelse med en omfattende rehabilitering i spillvannsnett rundt Østensjøvannet i perioden 1990-92. Trass i disse tiltakene er det verken blitt mindre planktonalger eller klarere vann i Østensjøvannet siden tidlig på 1980-tallet (Faafeng 1995). Ut fra dette har vi valgt å sammenstille alle data fra 1985 og fram til i dag, og bruke dette som et grovt bilde på den typiske sesongsyklusen i Østensjøvannet.



Figur 1. Sammenstilling av årvariasjoner i næringsalkonsentrasjoner i Østensjøvannet, basert på alle tilgjengelige data fra perioden 1985-1998; blå punkter: målinger i innsjøen, grønne punkter: målinger i utløpstunnelen, røde heltrukne linjer: robuste trendlinjer (LOWESS; Cleveland 1993).

Hvis vi ser på alle næringsalkdata fra perioden etter 1985 under ett (figur 1), framkommer det flere interessante mønstre. Først og fremst er det en betydelig økning i totalfosfor fra vintersituasjonen og utover sommeren, med maksimum i juli-august. Denne økningen i totalfosfor ledsages av en tilsvarende dramatisk økning i fosfat-konsentrasjonen i samme periode. I maksimumsperioden i juli-august er det ikke uvanlig at mer enn 50% av totalfosfor utgjøres av uorganisk fosfat. Totalnitrogen øker også i løpet av sommersesongen, men ikke i samme grad som totalfosfor. Uorganisk nitrogen (ammonium og nitrat) viser derimot ikke samme mønster som uorganisk fosfat, slik at økningen av totalnitrogen alt vesentlig er i form av organiske nitrogenforbindelser. Nitrat-konsentrasjonen

reduseres til under deteksjonsgrensen allerede tidlig på sommeren, mens ammonium holder seg stort sett på lave, men detekterbare verdier gjennom hele vekstsesongen.

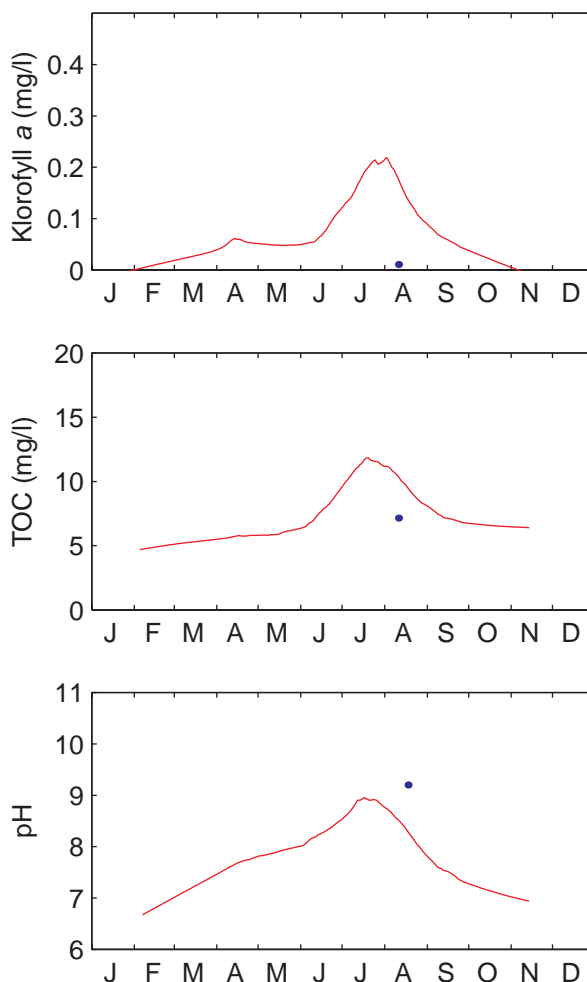
Det er grunn til å tro at den observerte sesongvariasjonen i totalfosfor ikke er bestemt av årstidsvariasjoner i ekstern fosfortilførsel til innsjøen. En robust statistisk test (Wilcoxon-Kruskal-Wallis) viser at det ikke er noen signifikant årstidsvariasjon ($\chi^2_3 = 3.51$, $p = 0.32$) mellom kvartalsvise eksterne fosfortilførsler over perioden 1990-98. Samme test viser også at det heller ikke er noen signifikant kvartalsvis variasjon i vannføring i den samme perioden ($\chi^2_3 = 4.47$, $p = 0.22$). Med andre ord er det mye som taler for at det observerte variasjonsmønsteret i næringssaltkonsentrasjoner skyldes interne prosesser i innsjøen, og at det er disse prosessene som ligger til grunn for at tilstanden i innsjøen har forbedret seg påfallende lite - trass i omfattende reduksjoner i ytre tilførsler gjennom de siste 10-15 årene.

Det er grunn til å anta at den fosfor-økningen som ikke direkte kan tilskrives tilførselsbekkene enten må komme som diffus tilførsel fra nærområdene rundt eller fra bunnslammet i innsjøen. På bakgrunn av det rike fuglelivet i og rundt Østensjøvannet har avføring fra fugler vært nevnt som en potensielt betydningsfull kilde for diffus tilførsel av næringssalter. Fra direkte innsamling av fuglelekkremitter i nærområdene til Østensjøvannet estimerte Undelstvedt (1996) fosfortilførselen fra fugler til ca. 40 kg pr. år. På årbasis synes dette å utgjøre mindre enn 20% av de eksterne tilførselene til innsjøen, noe som burde tilsi at fosfortilførsler fra fugl ikke alene er tilstrekkelig til å forklare den ofte mer enn femdoblete konsentrasjonsøkningen i innsjøen på sensommeren.

Bunnslammet (innsjøsedimentene) utgjør den antatt viktigste kilden til interne fosfortilførsler. Ut fra det sparsomme datagrunnlaget som er tilgjengelig kan en anslå fosforinnholdet i overflatesediment til ca 0.4 mg P pr g våtvekt (Gabestad 1998), noe som igjen tilsvarer – svært antydningvis – at ca 2.5 tonn fosfor er lagret i det øverste 1 cm-laget av innsjøsedimentene. Frigjøring av selv en beskjeden del av dette betydelige fosforlageret vil kunne utgjøre et betydelig bidrag til forfortilførselene til vannmassene.

Det er godt dokumentert at både mengde, artssammensetning og aktivitetsmønster hos fisk kan ha stor betydning for de interne tilførselene av fosfor i en innsjø. I grunne, næringsrike lokaliteter som Østensjøvannet, er det mye som tyder på at den direkte effekten av at fisken roter opp bunnslammet – enten på jakt etter næringsdyr eller fordi fisken rett og slett spiser sediment – kan utgjøre en betydelig andel av innsjøens fosforbudsjett. Nylig utførte fiskundersøkelser (Brabrand 1998) viser imidlertid at fiskebestandene i Østensjøvannet er overraskende små sammenliknet med andre innsjøer med samme trofinivå. Det er derfor mindre sannsynlig at aktivitet av fisk har stor direkte betydning for interne tilførsler av fosfor i innsjøen.

Østensjøvannet er såvidt grunt (største dyp 3.2 m) at vannmassene vil være godt omblandet og med høyt oksygeninnhold gjennom hele den isfrie sesongen. Siden innsjøsedimentene også har høyt innhold av uorganisk materiale er det rimelig å anta at mestparten av fosforet i sedimentet er adsorbert til treverdige aluminium- og jernoksider. Det er godt dokumentert at pH er en styrende faktor for fosfortutlekking fra sedimentene under slike betingelser (Møller Andersen 1975, Boström et al. 1988). pH i Østensjøvannet varierer gjennom sesongen fra <7 til >10, med de høyeste verdiene i juli og august (figur 2). Som ventet sammenfaller perioden med de høyeste pH-verdiene med de høyeste algebiomassene: algenes fotosyntese fjerner CO₂ raskere enn CO₂ kan tilføres gjennom utlufting mot atmosfæren. pH øker ved at likevektene i bikarbonat-buffersystemet forskyves tilsvarende mot økte konsentrasjoner av CO₃²⁻ og OH⁻. Hvis algebiomassen i utgangspunktet er fosfor-begrenset kan dette gi en ”snøballeffekt” eller positiv tilbakekopling: øking i algebiomasse gir økt pH, som gir økt utlekking av fosfor fra sedimentene, som igjen gir økt algebiomasse, osv.



Figur 2. Sammenstilling av årvariasjoner i algebiomasse (klorofyll a), totalt organisk karbon (TOC) og pH i Østensjøvannet, basert på alle tilgjengelige data fra perioden 1985-1998; røde heltrukne linjer: robuste trendlinjer (LOWESS; Cleveland 1993).

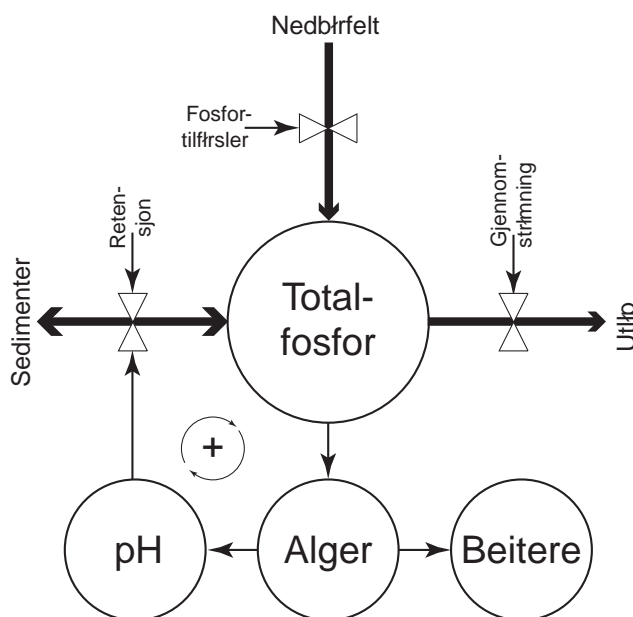
Hvis en ser på årvariasjonene i uorganisk nitrogen i Østensjøvannet (figur 1) ville det kanskje være naturlig å konkludere at algeveksten heller er nitrogen- enn fosforbegrenset, siden konsentrasjonene av både nitrat og ammonium er nær deteksjonsgrensene gjennom store deler av vekstsesongen. På den annen side viser figur 1 også en påfallende økning i totalnitrogen i samme periode som totalfosfor er på sitt høyeste. Siden sedimentene i Østensjøvannet har såvidt lavt innhold av organisk materiale er det ikke videre sannsynlig at sedimentene avgir nitrogen i samme omfang som fosfor. På samme måte som for fosfor er det antagelig også årstidsvariasjoner i ytre nitrogentilførsler for små til å kunne forklare denne oppsamlingen av totalnitrogen i innsjøen.

Den mest sannsynlige forklaringen som gjenstår er at økningen i totalnitrogen skyldes omfattende fiksering av atmosfærisk nitrogen (N_2). Direkte målinger av nitrogenfiksering i Østensjøvannet foreligger ikke, men det er velkjent at flere av de dominerende artene av blågrønnalger (cyanobakterier) i Østensjøvannet er fysiologisk tilpasset nitrogenfiksering i oksygenrikt miljø (for eksempel arter fra slektene *Anabaena* og *Aphanizomenon*). Det virker med andre ord som at det er betydelig kapasitet for å balansere eventuelle underskudd av nitrogen gjennom nitrogenfiksering, slik at fosforkonsentrasjonen derfor i praksis kan anses som styrende for algebiomassen - selv om algesamfunnet teknisk sett kan være nitrogenbegrenset over store deler av vekstsesongen. Når algebiomassen er på sitt høyeste, er sikten i vannet så lav at tilgangen på lys antagelig er av større betydning for algeveksten enn såvel

nitrogen- som fosforbegrensning. I dagens situasjon er antagelig algene i liten grad vekstbegrenset av verken nitrogen eller fosfor.

Modellbeskrivelse

Klassiske vannkvalitetsmodeller er gjerne fokusert på å beskrive middelsverdier av algebiomasse (gjerne som klorofyll *a*) som funksjon av mengden begrensende næringssalt (gjerne som totalfosfor). For Østensjøvannet er det tydelig at totalfosfor oppfører seg langt mer dynamisk enn hva som er vanlig i mer næringsfattige innsjøer – totalfosfor er vel så mye bestemt av algemengden som at algemengden er bestemt av totalfosfor. I slike situasjoner, hvor en har flere prosesser som gjensidig og samtidig påvirker hverandre, er det ofte nyttig å formulere en matematisk modell for bedre å kunne analysere situasjonen.

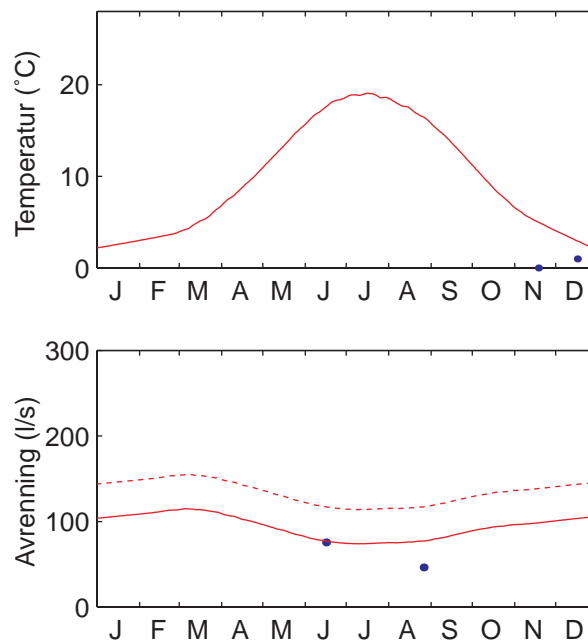


Figur 3. Prinsippskisse av prosesser som direkte eller indirekte tenkes å påvirke konsentrasjonen av totalfosfor i Østensjøvann (se tekst).

Utgangspunktet for enhver fosforbelastningsmodell er at det må foreligge en massebalanse mellom tilførsler fra nedbørfeltet og tap til sedimentene eller gjennom utløpet (figur 3). Det spesielle med dagens situasjon i Østensjøvannet er at sedimentene fungerer som en positiv netto-kilde for fosfor, slik at fosfor-transporten ut av innsjøen blir større enn tilførslene fra nedbørfeltet. Dette fenomenet er direkte knyttet til den dynamiske tilbakekoplingen som gir opphav til snøballeffekten mellom totalfosfor, algemengde, pH og fosforutlekking fra sedimentene (forsøkt illustrert med pluss-tegn i figur 3). Vi ser derfor dette problemkomplekset som det sentrale i en forenklet modell av fosforomsetningen i Østensjøvannet.

Selv om det foreligger data fra Østensjøvannet over en relativt lang tidsperiode, er parameterutvalget stort sett begrenset til tette målinger av totalt nitrogen og fosfor (særlig i utløpsbekken, jfr. figur 1), og mer sporadiske observasjoner av biologiske samleparametre som totalt organisk karbon (TOC) og klorofyll *a* (jfr. figur 2). Datagrunnlaget er enda mer sparsomt for mer detaljerte biologiske parametre som feks tellinger av plante- eller dyreplankton. For dyreplankton finnes det eksempelvis kun en håndfull observasjoner – vesentlig fra NIVAs regionale eutrofieringsundersøkelse. Alt i alt tilsier dette at det ikke er datagrunnlag for å prøve å lage noe mer enn en minimal modell med vekt på de biologiske mekanismene knyttet til transport og utnyttelse av fosfor.

Med dette utgangspunktet har vi valgt å formulere en matematisk eutrofieringsmodell for Østensjøvannet uttrykt gjennom kun tre tilstandsvariable: totalfosfor, planteplankton og dyreplankton. Den første tilstandsvariabelen (totalfosfor) er en naturlig konsekvens av de vurderingene som har vært gjort ovenfor med hensyn til betydningen av fosforbegrensning i forhold til andre faktorer som nitrogen og lys. Den andre tilstandsvariabelen (planteplankton, målt som klorofyll *a*) er i tillegg til å være en standardparameter for vurdering av eutrofieringstilstand også et nødvendig element for å beskrive tilbakekoplingen mellom algevekst og fosforutlekking fra sedimentene. Innledende eksperimenter med en forenklet modell tydet på det markerte fallet i klorofyll-konsentrasjonen allerede i slutten av august (jfr. figur 2) ikke kan forklares av fysiske faktorer som lys, temperatur eller gjennomstrømning. Det biologiske datagrunnlaget er antagelig for spinkelt til å konkludere entydig om betydningen av forskjellige mulige tapsprosesser eller begrensningfaktorer for dette fenomenet. Når vi har likevel valgt å fokusere på beiting som tapsprosess skyldes dette først og fremst at alternative forklaringsmodeller som feks virus/soppinfeksjoner, spormetallmangel eller fotokjemiske skader, faktisk er enda mindre utforsket.



Figur 4. Sammenstilling av årsvariasjoner i temperatur (målt i utløpsbekken) og avrenning (sum av alle tilførselsbekker), basert på alle tilgjengelige data fra Østensjøvannet i perioden 1985-1998. Røde heltrukne linjer: robuste trendlinjer (LOWESS; Cleveland 1993), rød stiple linje: avrenning inklusive 40 l/s overført fra Nøklevann.

Dersom vi kaller tilstandsvariablene for P , C og Z (alle i enhet mg/l), kan vi beskrive endringene pr. tidsenhet som 3 komplette differensiallikninger:

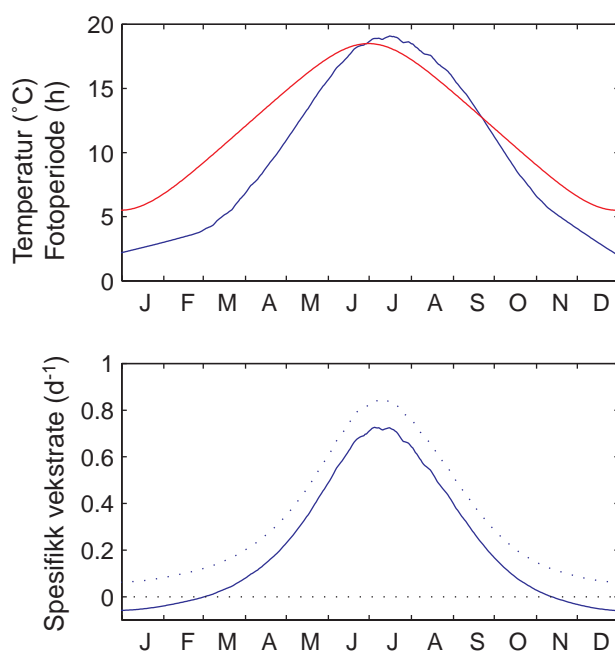
$$dP/dt = F_p(C) + L_p - (D/(1 - R_p))P \quad (1)$$

$$dC/dt = (\mu(P, C) - (r_c + D))C - \varepsilon I_z(C)Z \quad (2)$$

$$dZ/dt = (I_z(C) - (m_z + D))Z \quad (3)$$

Alle likningene er å oppfatte som massebalanser i den forstand at venstresiden (endring pr. tidsenhet) er lik differensen mellom tilførsler og tap. I massebalansen for totalfosfor (1) representerer de to første leddene fosfortilførsler fra henholdsvis sediment (F_p) og nedbørfelt (L_p), mens det siste leddet

beskriver tap gjennom utløpet. Tapsleddet er uttrykt ved en fortynningsrate (D : vannføring i forhold til innsjøvolum, med enhet d^{-1}) og en retensjonskoeffisient (R_p , dimensjonsløs). Fosforutlekking fra sedimentene (F_p) er antatt å være en funksjon av algemengde (se nedenfor), men uavhengig av feks temperatur. I massebalansen for klorofyll a (2) representerer det første leddet netto primærproduksjon, mens det andre beskriver tap gjennom dyreplankton-beiting. Siden vi har valgt å uttrykke plante- og dyreplankton i forskjellige enheter (henholdsvis mg klorofyll a og mg tørrvekt) må det innføres en konverteringsfaktor ε som uttrykker hvor mange enheter klorofyll a som må konsumeres for å produsere en enhet dyreplanktonbiomasse. Algenes spesifikke vekstrate (μ , enhet d^{-1}) er en funksjon av både totalfosfor og algemengde, mens dyreplanktonets spesifikke fødeinntak (I_z , enhet d^{-1}) bare er en funksjon av algemengden. Både μ og I_z er i tillegg antatt å avhenge av temperaturen, mens μ også antas å variere med daglengden (fotoperioden) gjennom året. Den siste massebalansen (3) er rett og slett dyreplanktonets netto fødeinntak: biomassen øker når det spesifikke fødeinntaket (I_z) er større enn tapet gjennom dødelighet (m_z) og fortynning (D), og avtar ellers.

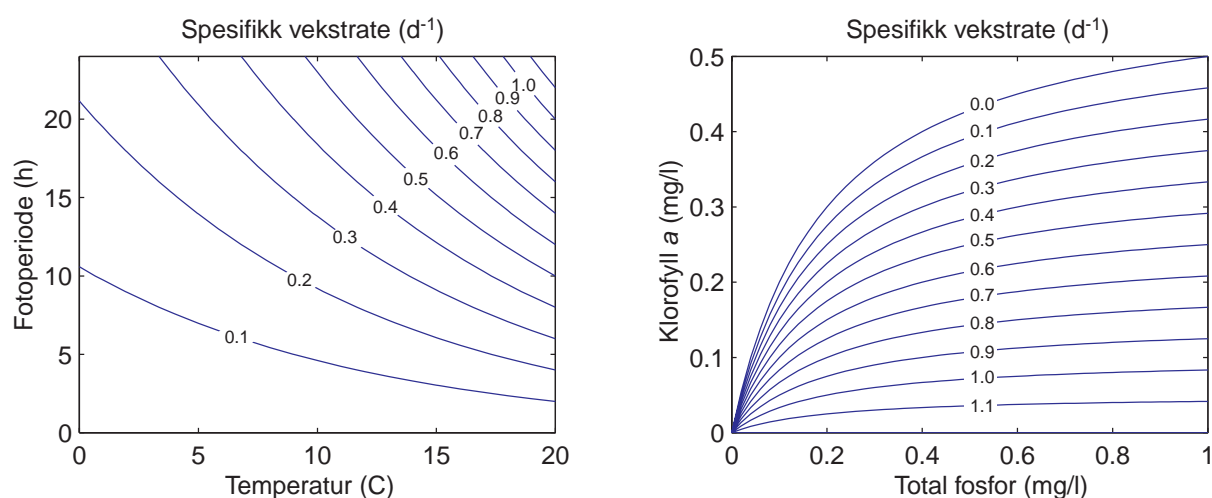


Figur 5. Effekten av temperatur, fotoperiode og fortynning på planteplanktonets maksimale, spesifikke vekstrate. Temperatur (blå kurve) og fotoperiode (rød kurve) fra henholdsvis figur 4 (LOWESS-linje) og astronomiske formelverk. Maksimal brutto og netto vekstrate er angitt ved henholdsvis stiple og heltrukken linje i den nederste figuren.

Lys, temperatur og vannføring er de viktigste ytre faktorene som styrer sesongvariasjonene i en innsjø. Siden det finnes såvidt begrensede data på lysklimaet i selve innsjøen er vi nødt til å velge en forenklet beskrivelse av hvordan lyset påvirker primærproduksjonen. I den løsningen som er valgt, er algenes spesifikke vekstrate (μ) antatt direkte proporsjonal med den relative fotoperioden (dvs daglengden som fraksjon av hele døgnet). Modellen benytter vel etablerte astronomiske formelverk for å beregne daglengden for en vilkårlig tid på året ved en gitt breddegrad. Temperaturen i Østsjøvann varierer relativt lovmessig fra år til år (figur 4), selv om målinger i utløpsbekken nok vil overestimere temperaturen i selve innsjøen på spesielt stille og solrike dager (jfr. enkeltmålinger $>25^{\circ}\text{C}$ i figur 4). Modellen er basert på et gjennomsnittså med temperaturgang lik trendlinjen i figur 4. Avrenningen til Østsjøvann er svært variabel med liten grad av fast sesongmønster (figur 4), noe som dels avspeiler at innsjøen har et nedbørfelt med relativt liten magasinkapasitet og dels at vintrene har vært preget av hyppige og utforutsigbare avsmeltningsepisoder gjennom hele perioden. I tillegg til avrenning fra de 8

tilløpsbekkene har Østensjøvannet vært tilført vann fra Nøklevann mer eller mindre jevnlig helt siden Nøklevann ble tatt ut av drikkevannsforsyningen i 1983. Modellen er basert på et gjennomsnittså med avrenningkurve lik trendlinjen i figur 4, med et tillegg på 40 l/s overført fra Nøklevann (den stiplede kurven i figur 4).

Hvis en for øyeblikket ser bort fra effektene av næringssaltbegrensning, vil den maksimale vekstraten som planteplanktonet til enhver tid kan oppnå være bestemt av temperatur og fotoperiode. Dersom en antar at typiske planktonalger er i stand til å oppnå en spesifikk vekstrate på 1.2 d^{-1} ved 20°C og i kontinuerlig lys (Andersen 1997), så burde den maksimalt oppnåelige vekstraten i Østensjøvannet ligge på ca 0.8 d^{-1} (figur 5). I fravær av beitere vil algene likvel utsettes for tap gjennom respirasjon og fortykning; mens fortykningstapet (D) er gitt direkte av vanngjennomstrømmingen, er respirasjonstapet (r_c) vanskelig størrelse å måle. Vi har valgt å simpelthen sette denne parameteren slik at algene er i stand til oppnå positiv nettovest ved isgang om våren. Ut fra figur 2 virker det også som det enkelte år med spesielle klimatiske forhold kan bygge seg opp betydelige algemengder lenge før isen normalt går.



Figur 6. Modellbeskrivelse av planteplankton: isolinjer for spesifikk vekstrate som funksjon av fotoperiode og temperatur i fravær av næringssaltbegrensning (venstre), og som funksjon av totalfosfor og klorofyll a ved 20°C i kontinuerlig lys (høyre).

Næringssaltbegrensning av algevekst kan beskrives på flere forskjellige måter, med forskjellige grader av realisme, kompleksitet og generalitet (Andersen 1997). Den kanskje enklest tenkelige modellen er det som gjerne kalles logistisk vekst: at det finnes en øvre grense (bæreevne) for hvor stor algemengden kan bli, slik at vekstraten går lineært mot null når en nærmer seg bæreevnen. Hvis vi kaller bæreevnen for K kan den logistiske vekstmodellen skrives som funksjon av algemengden (C):

$$\mu = \mu' (1 - C/K) \quad (4)$$

hvor μ' er den maksimalt oppnåelige vekstrate når algemengden går mot null. I et rent fosforbegrenset system vil det være naturlig å la bæreevnen være direkte proporsjonal med den tilgjengelige mengden fosfor. I Østensjøvannet, hvor det som nevnt er mulig at også lys og nitrogen kan være begrensende i perioder, er det rimelig å la bæreevnen ha en øvre grense K' som er uavhengig av fosforkonsentrasjonen. I modellen er det implementert ved å la bæreevnen være en metningsfunksjon (rektangulær hyperbel) av totalfosfor:

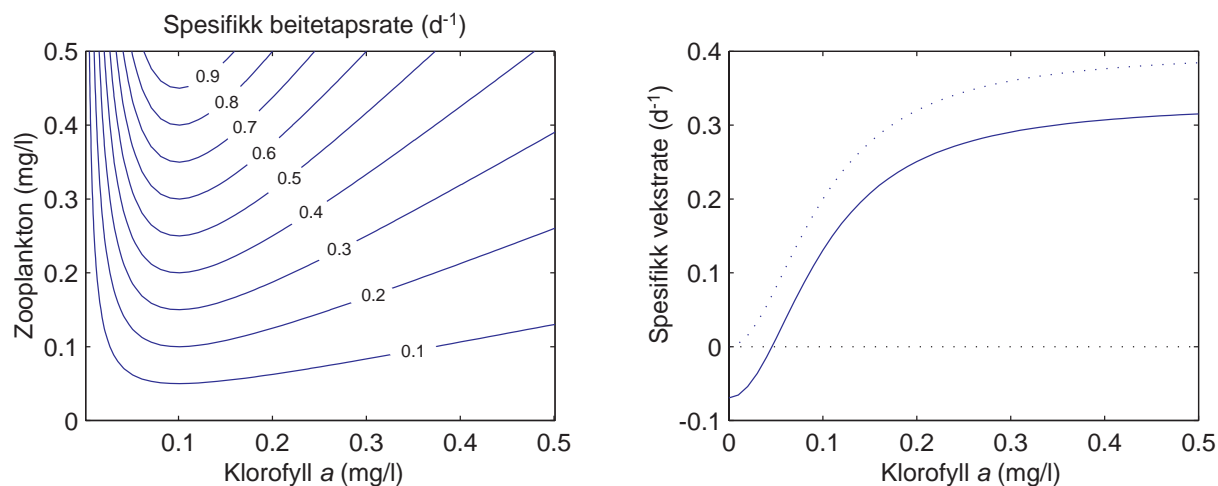
$$K = K' \frac{P}{P' + P} \quad (5)$$

På dette viset blir planteplanktonets vekstrate en økende funksjon av totalfosfor og en avtagende funksjon av klorofyll, slik som indikert i massebalanselikningen (2) og som illustrert i figur 6.

Selv om prinsippskissen i figur 3 framhever pH som bindeleddet mellom algemengde og fosfor-utlekkning fra sedimentene, så er likevel ikke pH en av tilstandsvariablene i modellen. Hovedårsaken til dette er de tekniske vanskene som knytter seg til å modellere utveksling mellom luft og vann av reaktive gasser som CO_2 . Selv om det for så vidt finnes gode modeller på dette området (feks Emerson 1975), vil en fullstendig implementering kreve mer i form av både regnekraft og tilleggsinformasjon til at det ble sett som regningssvarende. I stedet ble det valgt en rent fenomenologisk representasjon hvor utlekkingsraten (F_p) er gjort til en direkte funksjon av algemengden (C). Det er rimelig å anta hvis det er biologisk aktivitet som driver utlekkingsprosessen, så bør en ha at $F_p = 0$ når $C = 0$. Videre kan en anta at siden det er en ulineær sammenheng mellom CO_2 -assimilasjon og pH, så bør også relasjonen mellom F_p og C være ulineær og konveks. Modellen benytter den enklest tenkelige, kontinuerlige funksjon som tilfredstiller disse kravene, nemlig

$$F_p = F'_p (C/K')^2 \quad (6)$$

Den maksimale bæreevnen K' som ble introdusert i likning (5) er brukt som skaleringsfaktor for algemengden, slik at parameteren F'_p får tolkning som den maksimale utlekkingsraten (dvs den raten en vil ha når $C = K'$ og algemengden er på sitt absolutt høyeste). Erlandsen et al. (1980) målte fosfor-utlekkning ved forskjellig pH i intakte sedimentkjerner fra forskjellige innsjøer i Oslo-området. Middelerdien av alle forsøk med $\text{pH} > 10$ i dette materialet er $116 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. For Østensjøvannet, med et middeldyp på 2 m, vil dette tilsvare en tilførselsrate på $0.06 \text{ mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ som er den verdien for F'_p som er brukt i modellen.



Figur 7. Modellbeskrivelse av dyreplankton: isolinjer for planteplanktonets spesifikke beitetapsrate som funksjon av plante- og dyreplanktonmengde (venstre) og dyreplanktonets spesifikke brutto og netto vekstrate som funksjon av algemengde (høyre, stiplete og heltrukne linjer).

Det er godt dokumentert innenfor teoretisk økologi at formen på den funksjonelle responsen (tilsvarende $I_Z(C)$ i likning (2) og (3)) har stor betydning for egenskapene til et predator-bytte-system (se feks May 1981). Siden vi enda mindre kunnskap om dyreplanktonet i Østensjøvannet enn om de andre modellkomponentene, er det naturlig å velge en form som er minst mulig destabiliserende på systemet som helhet. Ut fra en slik betraktning har vi valgt å representere I_Z med en sigmoid (S-formet) funksjon som gjerne går under navnet Hollings type III-respons:

$$I_z = I'_z \frac{(C/C')^2}{1 + (C/C')^2} \quad (7)$$

hvor C' er en skaleringsfaktor og I'_z er dyreplanktonets spesifikke vekstrate ved uendelig fødetilgang. En sammenstilling av målte populasjonsvekstrater for forskjellige arter av dyreplankton (Andersen 1997) indikerte en typisk verdi for I'_z omkring 0.4 d^{-1} , om enn med en betydelig (opp til $\pm 50\%$) variasjon mellom arter.

Tabell 1. Parameterverdier benyttet i eutrofieringsmodell for Østensjøvannet

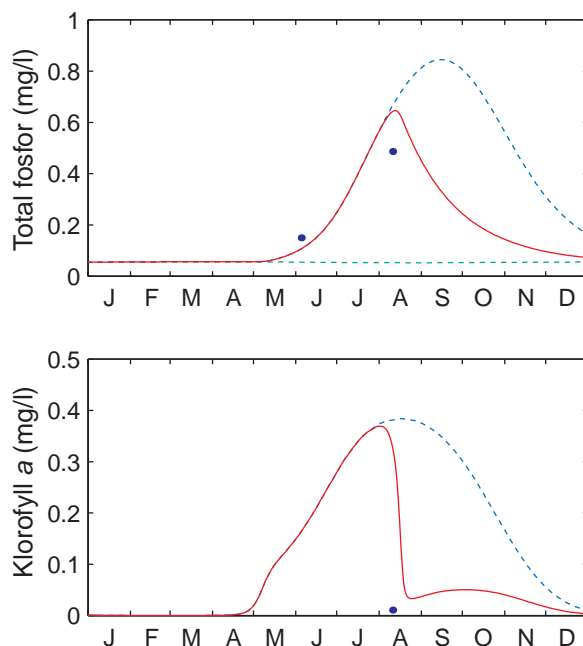
Symbol	Verdi	Enhet	Likning	Beskrivelse
L_p	0.0015	$\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$	(1)	Volumetrisk fosforbelastningsrate (= 330 kg år^{-1})
R_p	0.3	-	(1)	Teoretisk fosfor-retensjon
F'_p	0.06	$\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$	(6)	Maksimal fosforutlekkingsrate (ved $C = K'$)
P'	0.2	mg l^{-1}	(5)	Skaleringsparameter for klorofyllutbytte
K'	0.6	mg l^{-1}	(5)	Maksimalt klorofyllutbytte (bæreevne)
μ'	1.2	d^{-1}	(4)	Maksimal spesifikk vekstrate for planteplankton
r_c	0.1	d^{-1}	(2)	Spesifikk tapsrate for planteplankton
ε	1.0	mg mg^{-1}	(2)	Klorofyll konsumert pr. enhet dyreplankton produsert
m_z	0.05	d^{-1}	(3)	Spesifikk dødelighetsrate for dyreplankton
I'_z	0.4	d^{-1}	(7)	Maksimal spesifikk vekstrate for dyreplankton
C'	0.1	mg l^{-1}	(7)	Skaleringsparameter i funksjonell respons

Modellen som utgjøres av likningssettet (1)-(7) med parameterverdier som beskrevet i tabell 1, ble programmert i Matlab 5.2 (The MathWorks, Inc., Natick, Mass., USA) og løst med 4(5)-ordens Runge-Kutta-metode med variabel skrittlengde (ode45). Simulering av en enkelt årssyklus tok typisk 10-20 sekunder CPU-tid på en 233 MHz Pentium-maskin.

Resultater

Vi vil bruke modellen som er beskrevet ovenfor til gradvis å tilnærme oss selve hovedproblemstillingen, nemlig å vurdere hvilken effekt overføring av vann fra Nøklevann kan ha for vannkvaliteten i Østensjøvann. Såvidt fragmentarisk som datagrunnlaget tross alt er, har det antagelig liten hensikt i å prøve å simulere enkeltår. I stedet tar vi sikte på å representere en typisk årssyklus vurdert i forhold til hele innsjø-datamaterialet fra 1985 til 1998. I denne perioden har tilstanden i innsjøen beviselig ikke endret seg systematisk, selv om det tilsynelatende har vært betydelige variasjoner fra år til år. Siden den ytre fosforbelastningen ble redusert betydelig ved utbedringer i ledningsnettet omkring 1990-1992, har vi valgt å basere simuleringene på den gjennomsnittlige fosforbelastningen i perioden etter dette. Siden overføringen av vann fra Nøklevann har pågått praktisk talt sammenhengende siden 1990 (bortsett fra et opphold på ca ett år etter tørkesommeren 1996), har vi også valgt å la dette bidraget inngå i simuleringene av den typiske sesongsyklusen. I gjennomsnitt øker bidraget fra Nøklevann

fortynningsraten (D) med ca 35%, men fosforbelastningen (L_P) blir praktisk talt uendret på grunn av den lave totalfosforkonsentrasjonen i Nøkklevann (ca 5 $\mu\text{g/l}$).

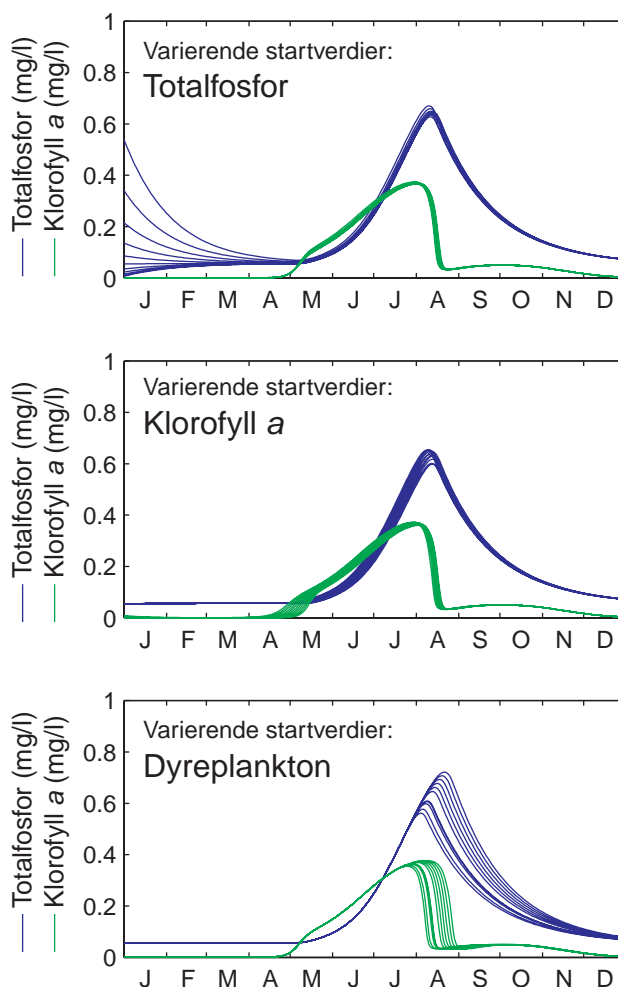


Figur 8. Simulering av typisk sesongsyklus av totalfosfor og klorofyll a i Østensjøvannet. Røde, heltrukne linjer: fullstendig modell (likning (1)-(3)); blå, stiplede linjer: forenklet modell uten dyreplankton.

Simulering av typisk sesongsyklus

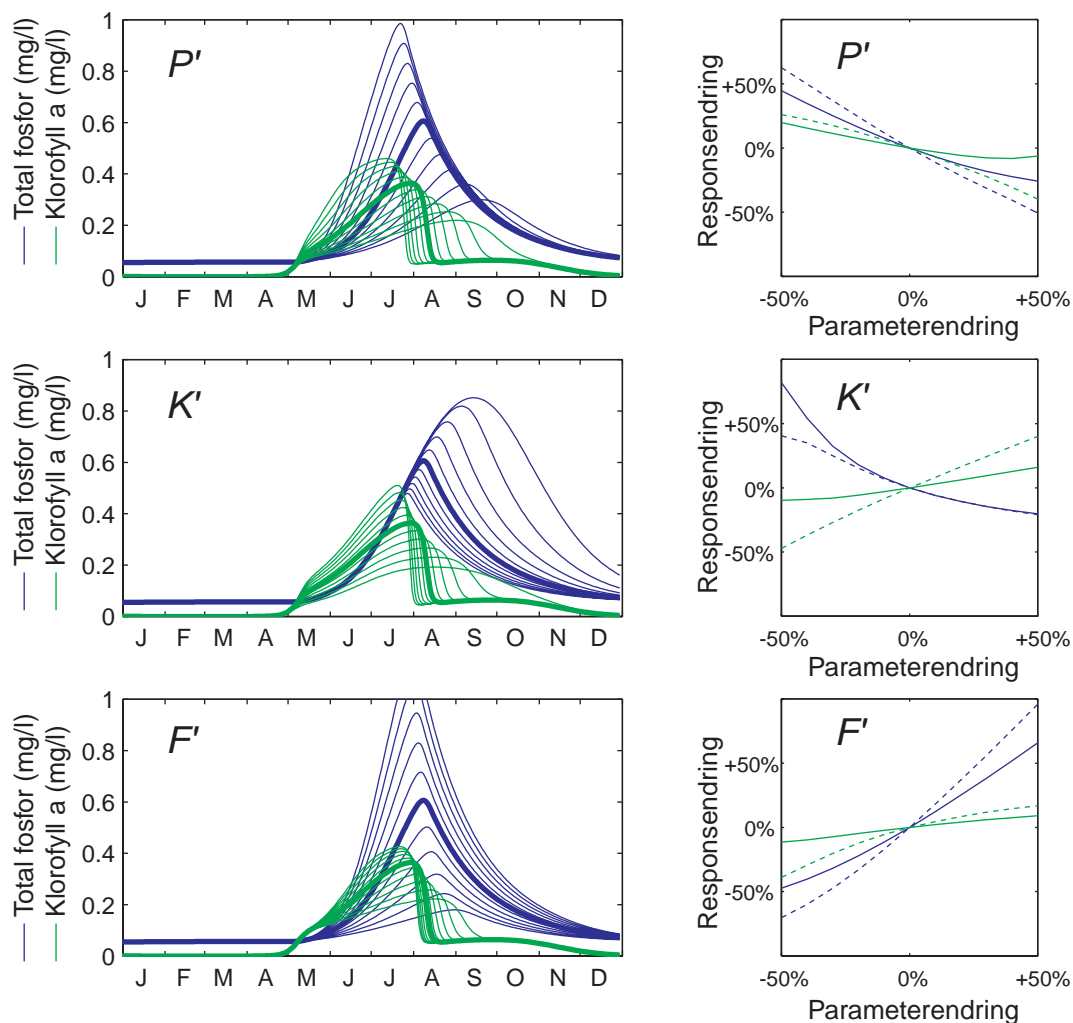
I grove trekk virker det som at den relativt enkle modellen av sammenhengen mellom algemengde og fosforutlekking fra sedimentene (likning (6)) er tilstrekkelig til å beskrive rimelig bra oppsvinget i totalfosforkonsentrasjonen i første del av vekstsesongen (figur 8). Dersom en løser likning (1)-(3) med startverdi lik null for dyreplanktonet (Z), vil denne tilstandsvariabelen holde seg lik null gjennom hele sesongen. I praksis får en da en forenklet modell med bare totalfosfor og klorofyll a som tilstandsvariable. Ved å sammenlikne den fullstendige og den forenklete modellen (figur 8), blir det tydelig at en må trekke inn andre faktorer enn lys og temperatur for å kunne gjenskape det kraftige fallet i algemengde allerede i midten av august. Dette kan i det minste tolkes som at årssyklusen av klorofyll a i Østensjøvann antagelig også involverer andre faktorer enn totalfosfor, selv om en nok bør være forsiktig med å tolke dette som et entydig bevis på at algemengden i Østensjøvannet kontrolleres av beiting.

Modellen viser antagelig for høye klorofyll-konsentrasjoner på forsommeren, særlig i juni. Årsaken til dette kan være at en tross alt har et betydelig skifte i algesamfunnet, fra kiselalger om våren til cyanobakterier om sommeren/høsten, og en derfor vil kunne ha en nedgang i totalmengde når en algegruppe forsvinner mens en annen bygger seg opp. Slike fenomener kan vanskelig avspeiles i en modell som representerer hele planteplanktonet i form av mengden klorofyll a . Modellen viser også et langsommere avtak i totalfosfor etter nedgangen i algemengde, enn det som er målt i innsjøen. Dette kan muligens skyldes at modellen er formulert slik at det ikke er noen kopling mellom tap av algebiomasse og tap av totalfosfor (slik det ville være hvis en del av den tapte algemengden tok med seg fosfor ned i sedimentene – enten direkte, eller i form av avfallsprodukter fra beitende dyreplankton). Trass i disse manglene ble det valgt å holde modellen så enkel som mulig framfor å øke kompleksiteten ved å inkludere stadig nye prosesser og tilstandsvariable.



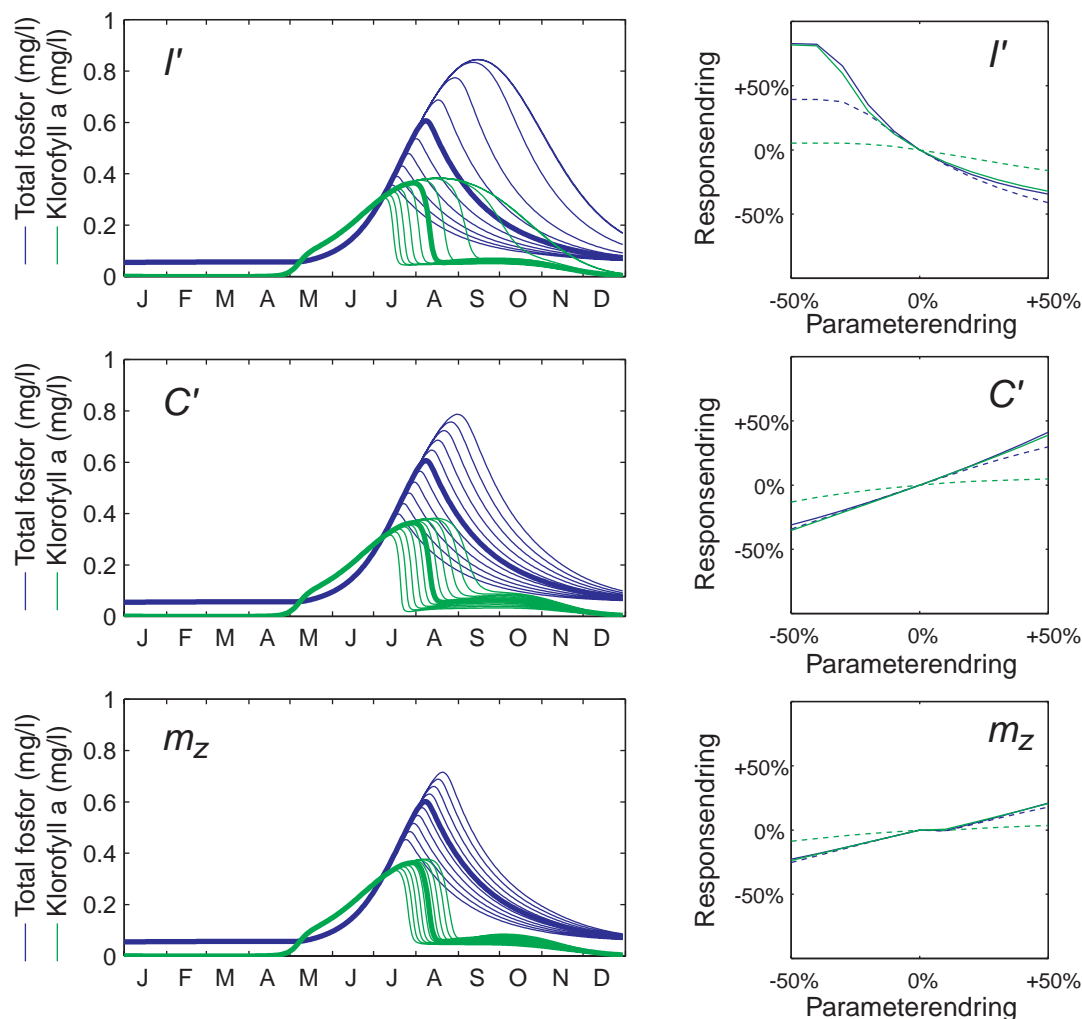
Figur 9. Følsomhet for startverdier i modell av totalfosfor og klorofyll a i Østensjøvannet. Startverdier variert mellom 1/10 og 10 ganger opprinnelig verdi.

I sterkt ulineære differensiallikningsystemer vil en ofte kunne finne løsninger med særdeles forskjellige egenskaper, avhengig av hvilke startverdier en velger. For å finne ut om slike fenomener er av betydning i denne modellen ble det gjort en serie med modellkjøringer hvor startverdiene for de forskjellige tilstandsvariablene ble variert systematisk fra 1/10 og opp til 10 ganger den opprinnelige verdien. Siden en får kvalitativt like løsninger (figur 9) mellom simuleringer som er forskjellige med opp til en faktor på 100 i startverdi, kan ikke modellen sies å være særlig følsom for valg av startverdier. Ut over dette kan en merke seg at effekten av endring i startverdi slår ut og dempes til forskjellige tidspunkt for de forskjellige tilstandsvariablene. Endringer i startverdien for totalfosfor vil stort sett være dempet ut før vekst sesongen har begynt. Endringer i startverdien for klorofyll a vil primært påvirke starttidspunktet for vekstsesongen, mens effekten er meget beskjeden etter at sesongmaksimum er passert. Endringer i startverdien for dyreplanktonet har naturlig nok størst effekt på å bestemme tidspunktet for nedbeiting av planteplanktonet, mens effekten både før og etter er ganske ubetydelig.



Figur 10. Følsomhet for parameterverdier relatert til totalfosfor og klorofyll a i modell av Østsjø-vannet. Parameterverdier variert mellom 50% og 150% av opprinnelig verdi. Elastisitetkurver (høyre side) viser relasjoner mellom prosentvis parameter- og responsending (blå kurver: totalfosfor; grønne kurver: klorofyll a; stiplete kurver: sesongmaksimum; heltrukne kurver: sesongmiddel).

Det knytter seg betydelige usikkerheter til flere av parametrene i modellen. Det er derfor viktig å undersøke i hvilken grad variasjoner i parameterverdier påvirker utkommet av simuleringene, både kvantitativt og kvalitativt. En slik sensitivitetsanalyse vil også være til hjelp for å vurdere hvilke prosesser eller parametre man bør prioritere og eventuelt studere nærmere for å bedre utsagnskraften til modellen. I sensitivitetsanalysene har vi valgt å variere parametre enkeltvis innenfor en ramme av $\pm 50\%$ av den nominelle parameterverdien (tabell 1). For enklere å kunne vurdere effektene har vi valgt å framstille effektene av parametervariasjoner også i form av såkalte elastisiteter, hvor den relative responsen uttrykkes som funksjon av den relative endringen i paramete verdi (figur 10-11).

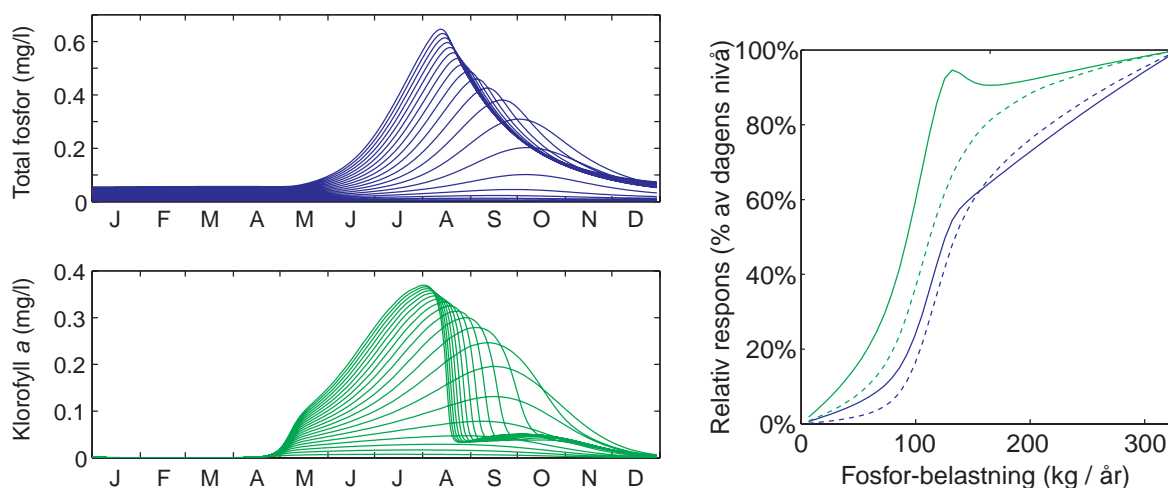


Figur 11. Følsomhet for parameterverdier relatert til klorofyll a og dyreplankton i modell av Østensjøvannet. Parameterverdier variert mellom 50% og 150% av opprinnelig verdi. Elastisitetkurver (høyre side) viser relasjoner mellom prosentvis parameter- og responsending (blå kurver: totalfosfor; grønne kurver: klorofyll a; stiplede kurver: sesongmaksimum; heltrukne kurver: sesongmiddel).

En samlet vurdering av tre parametre relatert til koplingen mellom totalfosfor og klorofyll a (figur 10) tilsier en nær direkte proporsjonalitet mellom parameterending og totalfosfor-respons, både som sesongmiddel og -maksimum. Elastisitetene i forhold til klorofyll a-respons er vesentlig svakere, særlig i forhold til sesongmiddel hvor en 50% økning typisk gir <10% endring i respons. Den gjennomgående lavere elastisiteten i forhold til sesongmiddel enn i forhold til sesongmaksimum kan stort sett forklares av at lavere maksimumsverdier i figur 10 er koplet til lengre varighet av perioden med høy alge-mengde, som igjen fører til at middelverdien endres mindre enn maksimumsverdien. Alt i alt kan en si at et typisk vannkvalitetskriterie som sesongmiddel av klorofyll a er relativt lite sensitivt til de modellparametrene som er vurdert i figur 10.

Et tilsvarende utvalg av parametre relatert til koplingen mellom klorofyll a og dyreplankton (figur 11) gir et kvalitativt forskjellig bilde. I denne sammenhengen blir den relative responsen klart minst for sesongmaksimum av klorofyll a, mens de tre andre responsparametrene følger hverandre ganske tett. Forklaringen på dette er trolig at sesongmaksimum av klorofyll a oppnås før beiteeffektene får nevneværdig betydning og at det derfor påvirkes lite av endring av parametre som beskriver dyreplanktonets dynamikk. Disse parametrene har først og fremst effekt på tidspunktet for nedbeitingsfasen, som igjen

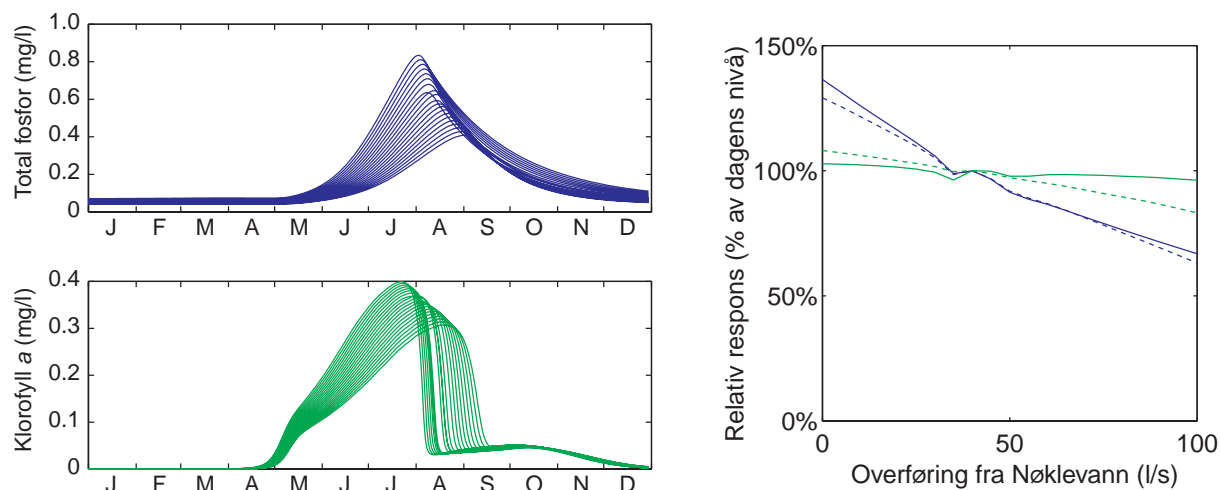
bestemmer lengden på perioden med høy algeblomstring, uten å direkte påvirke maksimumsverdien. Resultatet av dette blir at sesongmiddel av klorofyll *a* er betydelig mer følsom for endringer i beite-relaterte enn for fosforrelaterte parametre. Tross dette er elastisiteten likevel vesentlig svakere enn direkte proporsjonalitet: en 50% økning gir typisk <25% endring i sesongmiddel av klorofyll *a*. Alt i alt kan en si at et typisk vannkvalitetskriterie som sesongmiddel av klorofyll *a* er relativt sensitivt til de beiterelaterte modellparametrene som er vurdert i figur 11. Når en i tillegg tar hensyn til at det utvilsomt er disse modellprosessene som er belagt med størst usikkerhet, er det naturlig å gi dem høyere prioritet i framtidige studier.



Figur 12. Simuleringer av totalfosfor og klorofyll *a* i Østensjøvann ved forskjellige grader av reduksjon i ytre fosforbelastning i forhold til dagens nivå. Figur til høyre: relativ respons på belastningsreduksjon for totalfosfor (blå kurver) og klorofyll *a* (grønne kurver), enten som sesongmaksimum (stiplet) eller sesongmiddel (heltrukket).

Simulering av vannkvalitetsforbedrende inngrep

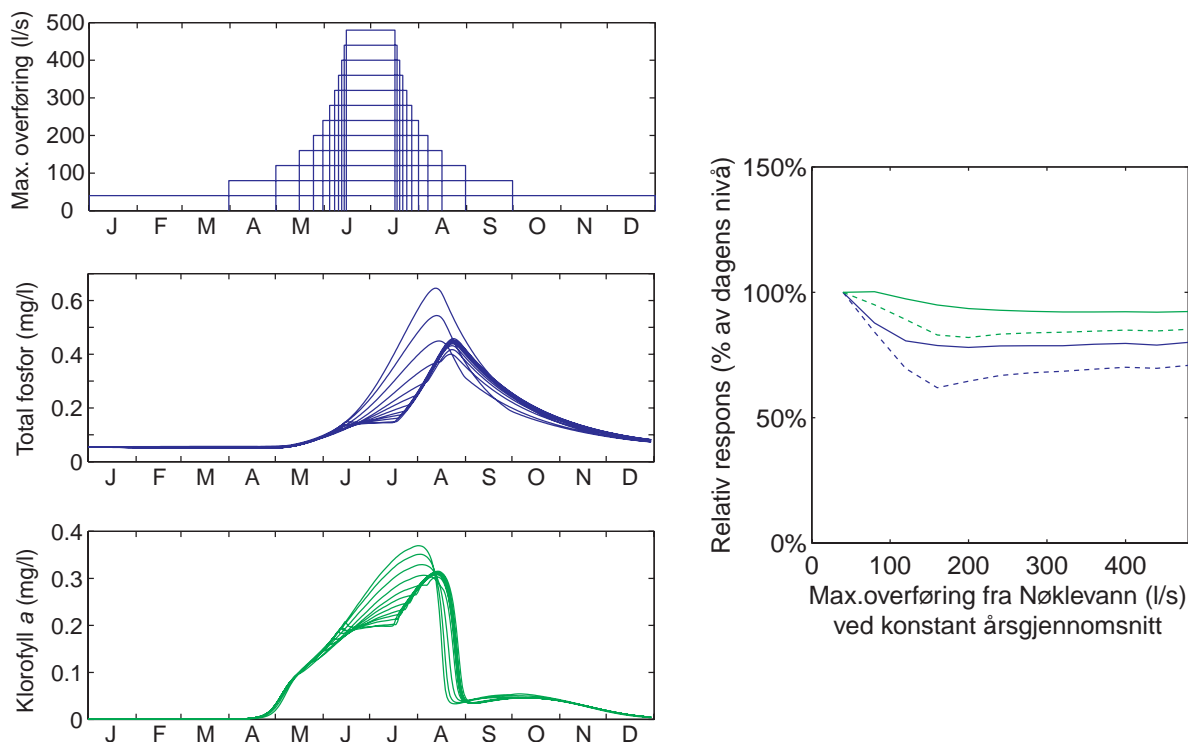
Før vi går inn på å vurdere potensialet for bedring av vannkvaliteten gjennom endring av vann-gjennomstrømningen i Østensjøvannet, er det naturlig å vurdere hvilke resultater som kan oppnås gjennom mer tradisjonelle virkemidler som ytterligere reduksjon av den ytre fosforbelastningen. Simuleringene i figur 12 indikerer at Østensjøvannet kan forventes å framvise relativt små endringer i vannkvalitet ved fosforbelastningsreduksjoner mindre enn 50% av dagens nivå. Selv ved en så betydelig reduksjon av fosforbelastningen som ned til 40% av dagens nivå, vil et typisk vannkvalitetsmål som sesongmiddel av klorofyll *a* bare reduseres med 5-10%. Forklaringen på dette er først og fremst at systemet i dag er såvidt begrenset av andre faktorer som lys og eventuelt nitrogen eller spormetaller, at klorofyllutbyttet pr. enhet fosfor er relativt lavt. Ved en ensidig reduksjon i fosforbelastningen vil betydningen av andre begrensende faktorer bli mindre, slik at klorofyllutbyttet pr. fosforenhet øker. Denne tilsynelatende bufferevnen i forholdet mellom totalfosfor og klorofyll kan nok være en viktig årsak til at vannkvaliteten i Østensjøvannet har bedret seg såvidt lite trass i betydelige belastningsreduksjoner gjennom de siste 20-25 årene. Det bratte fallet i både klorofyll og totalfosfor ved en reduksjon ned til ca 30% av dagens, indikerer et kritisk nivå som må nås for at ikke den positive tilbakekoplingen gjennom pH-drevet fosforutlekkning fra sedimentene skal komme i gang.



Figur 13. Simuleringer av totalfosfor og klorofyll a i Østensjøvann ved forskjellige vannmengder overført fra Nøkle vann. Figur til høyre: relativ respons på endring i vannmengde (i forhold til dagens situasjon (40 l/s)). Blå kurver: totalfosfor, grønne kurver: klorofyll a; - enten som sesongmaksimum (stiplet) eller sesongmiddel (heltrukket).

Alle simuleringer så langt er basert på en gjennomsnittlig overføring fra Nøkle vann tilsvarende 40 l/s med en totalfosforkonsentrasjon som er praktisk talt null ($< 5 \mu\text{g/l}$, i følge NIVAs regionale eutrofieringsundersøkelse). Hvis vi lar vannmengden fra Nøkle vann variere, mens vi holder vannmengden og fosfortransporten fra tilløpsbekkene konstant lik dagens nivå, får vi et bilde som vist i figur 13. Mens modellen gir den forventede fortyningseffekten på både sesongmiddel og -maksimum av totalfosfor, er effekten på klorofyll a-konsentrasjon tilsynelatende utbetydelig ($< 2\%$ selv ved vannmengder opp til 100 l/s). Forklaringen på dette synes å være at den økte fortyningen gjennom tilførsel fra Nøkle vann representerer en mer betydelig tapsfaktor for dyreplanktonet enn for planteplanktonet – simpelthen fordi dyreplankton har lavere maksimal vekstrate enn planteplanktonet. Den viktigste effekten av økt fortyning blir dermed å forsinke oppbyggingen av dyreplanktonbiomasse, som igjen forsinker nedbeitingsfasen og dermed forlenger algeblomstringen. Selv om økt fortyning også gir en viss reduksjon i maksimal algemengde, ble denne effekten langt på vei kompensert av en forlengelse av selv blomstringsfasen.

Som en siste variasjon har vi sett på mulighetene for å øke effekten av vannoverføring fra Nøkle vann ved å velge mer optimale tidspunkter eller sesongmønstre framfor å bare kjøre samme vannmengde året rundt. I utgangspunktet ville en vente at overføringen fra Nøkle vann har liten betydning utenfor vekstsesongen og en derfor burde få større effekt ved å samle hele den årlige vannmengden over en kortere periode. Siden vekstsesongen er relativt symmetrisk (jfr. figur 5), ble det valgt en relativt enkel strategi hvor en simulerte overføring av vannmengde tilsvarende et årsmiddel på 40 l/s over en periode omkring sommarsolhverv (figur 14). Ved et konstant årsmiddel må nødvendigvis vannføringen bli høyere når overføringsperioden blir kortere – de mest ekstreme situasjonene som er tatt med i figur 14 er derfor antageligvis hinsides kapasiteten til det eksisterende ledningsnett. Uansett, så blir hovedkonklusjonen fra simuleringene at eventuelle forsøk på å optimalisere sesongmønsteret for overføringen fra Nøkle vann, antagelig vil ha begrenset effekt. Forklaringen synes igjen å være relatert til at økning i fortyningsrate har sterkere effekt på dyreplanktonet enn på planteplanktonet, slik at algeblomstfasen blir forlenget – og at denne effekten overstiger en forholdsvis beskjeden fortyningseffekt på algemengden.



Figur 14. Simuleringer av totalfosfor og klorofyll a i Østensjøvann ved forskjellige sesongmønstre for samme vannmengde overført fra Nøklevann (40 l/s). Figur til høyre: relativ respons på endring i sesongmønstre (i forhold til dagens situasjon med konstant overføring gjennom året). Blå kurver: totalfosfor, grønne kurver: klorofyll a; - enten som sesongmaksimum (stiplet) eller sesongmiddel (heltrukket).

Diskusjon

Matematiske modeller befinner seg alltid i et skjæringspunkt mellom til dels gjensidig utelukkende hensyn til presisjon, generalitet og kompleksitet. Når vi her har forsøkt å lage en enklest mulig modell som best mulig beskriver dagens situasjon i Østensjøvannet, har vi utvilsomt prioritert generalitet på bekostning av presisjon og kompleksitet. Vi kan derfor ikke utelukke at modellbeskrivelsen utelater viktige prosesser i såvel dagens situasjon som i framtidige scenarier. Datagrunnlaget er imidlertid såvidt magert i forhold mange viktige faktorer at vi tviler på at det i dag er grunnlag for modeller av vesentlig høyere kompleksitet. Uansett vil mangelen på både prosessratemålinger og detaljerte biomassedata fra innsjøen gjøre det svært vanskelig å vurdere alternative modeller kvantitativt opp mot hverandre. På den annen side tror vi at de aspektene vi har valgt å konsentrere oss om er tilstrekkelig til å gi et i det minste kvalitativt riktig bilde av dagens situasjon i Østensjøvannet.

I dagens Østensjøvann synker ikke totalfosfor i løpet av sommersesongen slik en kan forvente ut fra typisk lærebokstoff i limnologi, men er faktisk høyest på denne tiden av året. I store perioder av året tilføres åpenbart innsjøens vannmasser mer fosfor gjennom indre prosesser enn gjennom ytre tilførsler. Dette gjør at fosfor-retensjonen blir negativ, og at dermed selve nøkkelbegrepet i klassiske fosfor-belastningsmodeller nærmest blir verdiløst. På tilstrekkelig lang sikt vil det i enhver innsjø etablere seg en likevekt hvor mengden fosfor som transporteres ut er mindre enn den som transporteres inn. Dagens negative fosfor-retensjon i Østensjøvannet kan nødvendigvis ikke fortsette i det uendelige. På den

annen side er lageret av fosfor i sedimentene er tydeligvis tilstrekkelig stort til at det har vært liten endring i totalfosforkonsentrasjoner i innsjøen siden midten av 80-tallet, selv om ytre tilførsler er blitt betydelig redusert i den samme perioden. Siden modellen er fokusert på en vekstsesongskala, og ikke gjør noe forsøk på å beskrive massebalansen til fosfor-reservoaret i sedimentene, kan den heller ikke antyde noe om hvor lang tid som må gå før en ny likevekt eventuelt etableres. Mer detaljert kjennskap til både fosfor-mengder og -tilstandsformer i sedimentene vil være nødvendig for eventuelt å videreutvikle modellen til å kunne si noe om langtidseffektene av eventuelle tiltak i nedbørfeltet eller i selve innsjøen (feks. fjerning av overflatesedimenter). Pågående aktiviteter i regi av prosjekt ”Renere Østensjøvann” (bla. to hovedoppgaver ved NLH), vil antagelig være av stor nytte i denne sammenhengen.

Vi har valgt en minimalistisk beskrivelsesmåte av de interne fosfortilførselsprosessene ved å la fosfortutlekking fra sedimentene være en direkte funksjon av algemengde. I en mer mekanistisk korrekt modell ville en antagelig la utlekking fra sedimentene være en funksjon av pH. pH er bestemt av endringer i bikarbonatbuffersystemet som følge av balansen mellom algenes fotosyntetiske CO₂-opptak og CO₂-utveksling med atmosfæren. Fotosyntesen er igjen relatert til algemengde, lys, temperatur, næringssalttilgang, osv. Ut fra det en vet om de tekniske problemer som knytter seg til for eksempel pH-modellering i eutrofe innsjøer, er det tvilsomt om en mer mekanistisk korrekt modell er oppnåelig uten direkte målinger av CO₂-utvekslingen mellom vann og luft i Østensjøvannet.

Selv om andre begrensende faktorer som lys og nitrogen kan være av stor betydning for algeveksten i deler av sommersesongen, er det likevel valgt å kun se på fosfor i modellen. Dette valget er dels begrunnet av hensynet til å holde modellen så enkel som mulig, og dels til den generelle mangelen på kunnskap om viktige prosesser i nitrogenbudsjettet som feks nitrogenfiksering og denitrifikasjon. Ved å samle andre begrensingsfaktorer i et forenklet og litt abstrakt bæreevnebegrep får en likevel representert kanskje den viktigste effekten, nemlig at algemengden synes å endre seg lite med fosforbelastningen i dagens tilstand. Denne bufferkapasiteten i forholdet mellom fosforbelastning og algemengde er antagelig en viktig årsak til at betydelige reduksjoner i fosforbelastningen til Østensjøvannet kun har gitt beskjedne forbedringene i vannkvalitet.

Vi hadde i utgangspunktet ikke regnet med å måtte trekke inn høyere trofiske nivåer i modellbetraktningen, særlig ettersom datagrunnlaget er vesentlig spinklere på dette området. Det viste seg imidlertid svært vanskelig å gjenskape den typiske sesongsyklusen i algemengde uten å introdusere en ekstra tapsfaktor som virker sterkere i siste enn i første del av vekstsesongen. En slik effekt vil nettopp skapes ved at en dyreplanktonbiomasse langsomt bygger seg opp gjennom forsommeren og først utgjør en betydelig tapsfaktor for planteplanktonet på ettersommeren. Det knytter seg betydelige usikkerheter til de parameterverdiene som er valgt for dyreplanktondelen av modellen, slik at denne delen vanskelig kan verken forkastes eller forbedres uten mer detaljerte studier av sesongvariasjoner i dyreplanktonbiomasse og -artssammensetning. Ut fra de indikasjoner en har på at modellen er relativt sensitiv til dyreplankton-relaterte parametere (figur 11), er det gode grunner til å legge større vekt på dyreplanktonet i framtidige undersøkelser i Østensjøvannet. Pågående aktiviteter i regi av prosjekt ”Renere Østensjøvann” (Løvstad), vil være et viktig utgangspunkt for en videreutvikling av beitedelen av modellen.

Simulering av forskjellige vannkvalitetsforbedrende tiltak i Østensjøvannet illustrerer først og fremst at innsjøen har betydelig bufferevne i forholdet mellom fosforbelastning og algemengde. Selv med så mye som 50% ytterligere reduksjon i ytre fosforbelastning forventes en derfor å få mindre enn 10% reduksjon i vekstsesongmiddel av klorofyll *a*. Modellsimuleringene indikerer at en ytterligere reduksjon helt ned til 30% av dagens fosforbelastning er nødvendig før en kan forvente et vesentlig omslag i vannkvaliteten i Østensjøvann. Dette omslaget er først og fremst knyttet til underskridelse av en kritisk grense for igangsetting av en selvforsterkende prosess (snøballeffekt) i kopligen mellom algemengde og fosfortutlekking fra sedimentene.

Simulering av effekter av vanngjennomstrømning illustrerer først og fremst at overføring av rent vann fra Nøklevann har større betydning for å redusere totalfosfor enn for å redusere klorofyll *a*. Sesongmiddelverdi av totalfosfor forventes å øke med ca 35% ved fullstendig bortfall av overføringen fra Nøklevann, noe som i praksis lar seg forklare som en ren fortyningseffekt. Effekten på planteplankton er mer sammensatt: algenes vekstratepotensiale er såvidt betydelig at selve fortyningseffekten av økt vanngjennomstrømning vil utgjøre en relativt ubetydelig tapsrate, selv ved overføringer fra Nøklevann som antagelig er på kanten av det teknisk mulige. Den omtalte bufferevnen i forholdet mellom totalfosfor og klorofyll bidrar til å dempe klorofyll-responsen på endringer i vanngjennomstrømning.

Et annet forhold som bidrar ytterligere til denne dempingen er at endringer i fortyningssrate tilsynelatende har større effekt på utviklingen av dyreplanktonet enn planteplanktonet. Dette siste fenomenet lar seg forklare ved at dyreplanktonet har vesentlig lavere maksimal vekstrate enn planteplanktonet, slik at selve fortyningstapet får større relativ betydning. Økt fortykning gjør at dyreplanktonet bruker lengre tid på å bygge opp tilstrekkelig biomasse til å kunne påføre planteplanktonet et nevneverdig beitetap. Nettoresultatet av økt gjennomstrømning blir derfor at maksimalverdien i algeblomstringsfasen blir noe redusert samtidig som at varigheten blir forlenget, noe som til sammen gjør at responsen i form av sesongmiddelverdi av klorofyll *a* blir spesielt liten.

Erfaringer fra andre grunne, eutrofierte innsjøer peker mot at en typisk har to alternative tilstander: enten klart vann med mye undervannsvegetasjon (fastsittende alger og høyere planter), eller turbid vann med mye planktonalger og tilsvarende lite bunnvegetasjon (Moss 1998, Scheffer 1998). I tillegg er det mye som tyder på at innsjøer kan ha stor treghet mot å endre seg fra den ene tilstanden til den andre, samtidig som at slike tilstandsendringer gjerne er både brå og dramatiske når de først skjer. Tilstanden i Østensjøvannet i dag er klart karakterisert av turbid vann med relativt lite undervannsplanter, samtidig som det er tydelige tegn til at utbredelsen av bunnvegetasjon er økende (Mjelde 1999), særlig for vasspest (*Elodea canadensis*) og den såkalte hårnettalgen (*Hydrodictyon reticulatum*). Begge disse artene har vist seg i stand til øke dramatisk i utbredelse og danne rene monokulturer i løpet av kort tid dersom forholdene ligger til rette for det. All erfaring tilsier at sannsynligheten for et slikt tilslag i bunnvegetasjonen vil øke i en eventuell oppklarningfase som følge av ytterligere reduksjon av næringsstofftilførselen til Østensjøvann, men det er antagelig ikke mulig å gi en mer presis tallfesting av en slik sannsynlighet uten å gjøre eksperimentelle undersøkelser i innsjøen.

Wesenberg (1995) påpeker at Klopptjern og kanalene i Bogerudmyra har fungert som et viktig fristed (refugium) for flere arter som ellers er blitt borte i selve Østensjøvannet. Det er også registrert flere rødlistearter i Bogerudmyra, som av den grunn blir ansett som verneverdig også i nasjonal målestokk. I dagens situasjon får Bogerudmyra ca 60% av vanntilførselen fra Nøklevann, noe som tilsier at overføringen har betydelig effekt på de hydrologiske forholdene i kanalsystemet og våtmarka omkring Klopptjern. Likevel er det vanskelig å gi noen presis vurdering av hvilken betydning et bortfall av overføringen fra Nøklevann måtte ha for vegetasjonssamfunnene i Bogerudmyra. Modell-vurderingen har begrenset seg til kun å vurdere effekter på planktonsamfunnet i selve Østensjøvannet, og kan derfor ikke brukes til å si noe om dette aspektet. Det er usikkert hvorvidt det er mulig å gi en historisk dokumentasjon av eventuelle effekter (for eksempel ved sammenlikning av flybilder av området), siden det har vært gjort såvidt mange samtidige inngrep i nedbørfeltet i løpet av den vegetasjonshistorisk sett korte perioden som overføringen fra Nøklevann har vært operativ. Vurdert i forhold til de verneverdier som står på spill og de usikkerheter som knytter seg til eventuelle effekter, bør antagelig situasjonen i Bogerudmyra følges opp med et eget overvåkingsprogram ved et eventuelt bortfall av tilførselen fra Nøklevann.

Fjorårets undersøkelser av fiskesamfunnet i Østensjøvann (Brabrand 1998) konkluderte med at fiskebestandene i Østensjøvann er betydelig mindre enn det som er vanlig å forvente fra nærliggende innsjøer på tilsvarende trofinivå. Brabrand (1998) fant at flere årsklasser av fisk tilsynelatende manglet fullstendig, noe som igjen tyder på at episodisk massedød kan være en viktig regulerende faktor for

fiskesamfunnet i Østensjøvannet. Slike episoder kan ha mange årsaker, hvorav algegifter eller oksygenbrist kanskje er blant de mest aktuelle kandidatene. Selv om det aldri har vært direkte påvist fiskedød som følge av algegifter i Østensjøvannet, kan slike mekanismer likevel ikke utelukkes (Brabrand 1998). Algesamfunnet i Østensjøvannet er ofte dominerte av arter som er kjent for å kunne være giftproduserende (feks *Microcystis* sp. og *Anabaena* spp.), og både biotester for akutt giftighet og kjemiske analyser har påvist cyanotoksiner (blågrønnalgegifter). Fiskedød på grunn av oksygenmangel under isen vinterstid har jevnlig vært påvist i Østensjøvannet helt siden århundreskiftet. Dersom oksygenforholdene om vinteren er kritiske for fiskebestandene i Østensjøvann vil dette kanskje tale for å omfordele en eventuell overføring av rent, oksygenrikt vann fra Nøklevann til denne årstiden. Det er foreløpig ikke gjort noe forsøk på å kvantifisere effekten av et slikt inngrep – aller helst burde en slik vurdering gjøres på bakgrunn av ytterligere informasjon om oksygenforhold og oksygenforbruk vinterstid i Østensjøvannet.

Referanser

- Andersen, T. 1997. Pelagic nutrient cycles: Herbivores as sources and sinks for nutrients. *Ecological Studies* 129, Springer Verlag. 280 s.
- Boström, B., Møller Andersen, J., Fleischer, S. & Jansson, M. 1988. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. *Hydrobiologia* 170: 229-240
- Brabrand, Å. 1998. Fiskesamfunnet i Østensjøvannet, Oslo kommune: Artssammensetning, dominans og vurdering av begrensede faktorer. LFI-rapport 179-1998. 20 s.
- Cleveland, W. S. 1993. *Visualizing Data*. Hobart Press.
- Emerson, S. 1975. Chemically enhanced CO₂ exchange in a eutrophic lake: a general model. *Limnol. Oceanogr.* 20: 743-753
- Erlandsen, A., Grøterud, O. & Skogheim, O. K. 1980. Intern tilførsel av fosfor i innsjøer ved høy pH. Stensiltrykk nr. 7/1980. 27 s.
- Faafeng, B. 1995. Østensjøvannet. Pryd eller pest? NIVA-rapport 3348-95. 13 s.
- Gabestad, H. 1998. Restaurering av Østensjøvannet. Prosjekt "Renere Østensjøvann". Grunnlagsmateriale. OVA-rapport 99:0003. 23 s + vedl.
- Løvstad, Ø. & Wold, T. 1995. Østensjøvann 1979-1994. Eutrofiering, plantenæringsstoffer og blågrønnalger. OVA-rapport. 15 s.
- May, R. M. (ed) 1981. *Theoretical ecology. Principles and applications*. Blackwell Sci. Publ. 489 s.
- Mjelde, M. 1999. Vasspest i Østensjøvann. NIVA-rapport 4128-99. 11 s.
- Moss, B. 1998. Shallow lakes, biomanipulation and eutrophication. *SCOPE Newsletter* 29. 44 s.
- Møller Andersen, J. 1975. Influence of pH on release of phosphorus from lake sediments. *Arch. Hydrobiol.* 76: 411-419
- Prairie, Y. T. 1989. Statistical models for the estimation of net phosphorus sedimentation in lakes. *Aquat. Sci.* 51: 192-210
- Scheffer, M. 1998. *Ecology of shallow lakes*. Chapman & Hall.
- Undelstvedt, J. K. 1996. Eutrofiering av Østensjøvannet – har fugler noen betydning? Hovedoppgave, Institutt for Vann- og Jordfag, NLH. 47 s.
- Vollenweider, R. A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33: 53-83
- Wesenberg, J. 1995. Østensjøvannet. En temakartserie over botaniske verneverdier. Utarbeidet på oppdrag fra Fylkesmannen i Oslo og Akershus, Miljøvernavdelingen.