

# Naturlig UV-stråling i vann; doser og effekter

Av Dag O. Hessen

Dag O. Hessen er professor  
ved Biologisk Institutt, UiO, og forsker II ved NIVA

Innlegg på fagtreff i Norsk Vannforening 23. januar 1995.

## **UV-stråling som problem:**

Begreper som UV, ozonhull, klimaendring, og CO<sub>2</sub>-balanse er i dag blitt hyppige gjester i mediabildet og framstår for de fleste i dag som overordnede trusler mot økosystemer og mennesker. Samtidig kommer det ikke alltid fram hva som er hva, og sammenhenger og realiteter bak oppslagene kan være uklare. Offentlig uenighet blant forskere bidrar ikke nettopp til å dempe disse uklarhetene. Et av de sentrale tema er hvordan effekter av ultrafiolett stråling (UV) kan påvirke både kjemiske og biologiske aspekter ved vann, og vi skal her se litt på hva man faktisk vet om disse effektene.

Solspekteret kan inndeles på flere måter, men når det gjelder biologisk produksjon er det vanlig å dele det grovt mellom synlig, fotosyntetisk aktivt lys (PAR) og ultrafiolett lys (UV). Mens det synlige lyset stimulerer produksjon, vil UV-lys stort sett virke negativt inn på de fleste organismer. UV-lys kan igjen inndeles grovt i tre hovedkategorier; UV-C fra 200 til 280 nm, UV-B fra 280-315 nm og UV-A fra 315-400 nm. Jo kortere bølgelengder,

desto større er skadeeffektene. UV-C blokkeres så og si fullstendig i atmosfæren, det meste av UV-B absorberes også, mens det meste av UV-A når jordoverflaten. Ozon (O<sub>3</sub>) står for det meste av denne absorpsjonen, og uten ozonfilteret ville liv på landjorda og i de øvre vannlag ikke være mulig. Det meste av denne UV-blokkeringen skjer i stratosfæren, hvor det normalt er et ozonmaksimum ca. 20 km over bakkenivå. En reduksjon av dette ozonlaget vil ha liten effekt på UV-C og UV-A, men vil kunne gi betydelig økt innstråling av UV-B. I Antarktis har det gjennom de siste 10 år vært en betydelig svekkelse av dette laget, i de mest dramatiske periodene (den antarktiske senvinter og vår) over 50 %, med en tilsvarende økning av innstrålt UV-B. Over den nordlige halvkule har effektene vært klart mindre, men også over arktiske områder har det vært en trend med 5-10 % nedgang (tallene er noe sprikende) over siste dekad (Kerr & McElroy 1994). Det er ingen stor uenighet om at årsaken til dette ligger i de betydelige antropogene utslipp av klorerte forbindelser. Spesielt klor-monoksid (ClO) spaltes ozon svært effektivt, men også naturlige prosesser som vulkanutbrudd kan gi betydelige bidrag. De klimatiske

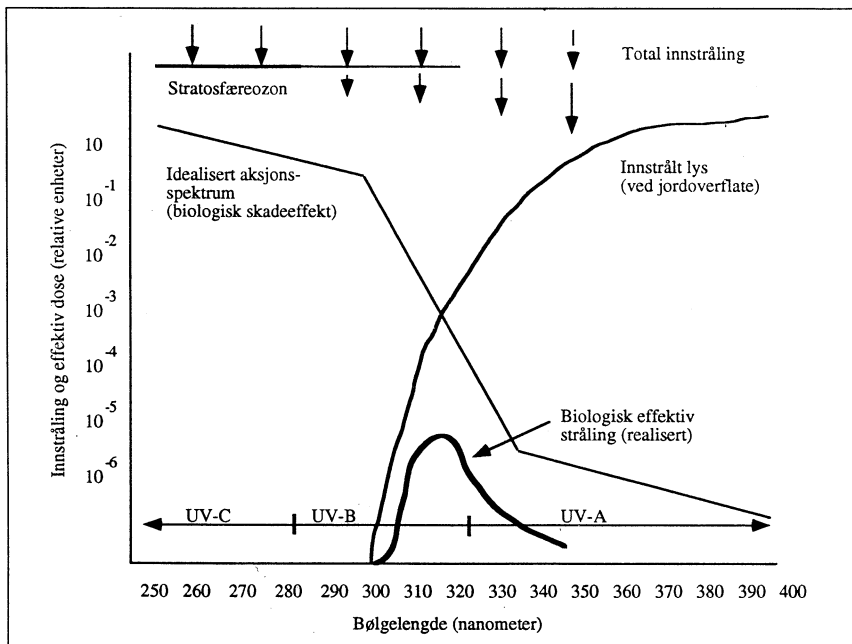


Fig. 1. Relativ biologisk effekt er en funksjon av aksjonsspekteret (som generelt øker raskt mot kortere bløgelengder) og det intensiteten av lys som når jordoverflaten eller organismen (dette øker fra UV-B til synlig lys).

forhold over de arktiske områder tilsier en mindre dramatisk effekt her enn over antarktis, og dagens prognoser antyder maksimalt en 20 % nedgang i ozonlaget (rundt år 2000), før utfasingen av ozonnedbrytende stoffer er kommet så langt at ozonlaget igjen vil bygges opp. Det er imidlertid store usikkerheter knyttet til dette, spesielt fordi det her er snakk om ikke-lineære sammenhenger mellom klorkonsentrasjoner og ozonlagseffekter. Det antarktiske "ozonhull" ble etablert meget raskt. Samtidig som stratosfæreozon er på vei ned, er bakkenært ozon i bynære områder økende. Dette skyldes i stor grad forbrenningsprosesser. Ozon er en meget sterk

oksidant, og denne økningen gir også både materielle og biologiske skadeeffekter, men dette er et helt annet problemkompleks som vi skal la ligge her. Denne økningen vil bare i ubetydelig grad motvirke effektene av redusert stratosfæreozon.

### Hva betyr redusert ozon og økt UV:

Selv om problemstillingene i dag er fokusert rundt disse mulige ozonlagsendringene, så skal man være klar over at også den "naturlige" UV-stråling har betydelige økologiske effekter, og er helt styrende for en rekke kjemiske og biologiske prosesser på land og i vann.

Enhver økning må derfor anses for skadelig og uønsket. Hvilke effekter kan så en 10 eller 20 % svekkelse av ozonlaget ha? For relativt beskjedne nedganger i ozonlaget kan man regne et 1:1 forhold mellom prosentvis svekkelse og prosentvis økning i UV-stråling. Med de ozonreduksjoner som til nå kan observeres over den nordlige halvkule, vil stråledosen maksimalt representere en forflytning fra Trondheim til Oslo. For større reduksjoner blir innstrålingen noe større, og en 20 % svekkelse vil bety nær 30 % økning i UV. Midlet som årsdose vil dette tilsvare en forflytning fra Oslo til Paris. En 50 % ozonreduksjon vil tilsvare en forflytning fra Oslo til Mallorca. For vårt vedkommende er det altså ikke snakk om noen katastrofe-effekter, men for sensitive arter og økosystemer kan dette gi betydelige effekter, og for mange økosystemkomponenter vil enhver økning av stråledose måtte regnes som skadelig. For Antarktis ble det beregnet at en 58 % svekkelse av ozonlaget ville bety 300 % mer UV-B, men bare 31 % mer synlig lys. Hva en gitt økning i UV-dose vil bety, kan også variere svært mye, alt etter hvilke organisme man ser på, og ikke minst hvilke cellekomponent eller cellefunksjon man betrakter. Fordi virkningsspekteret øker dramatisk mot kortere bølgelengder, vil en svært liten økning i UV-B bety mye mer enn en tilsvarende økning i UV-A. Ulike organismer eller cellekomponenter har ulikt virkningsspekter. Den skadelige stråling blir en funksjon både av innstrålt lys og potensielt skadelig lys som illustrert i Fig. 1. De fleste celle-

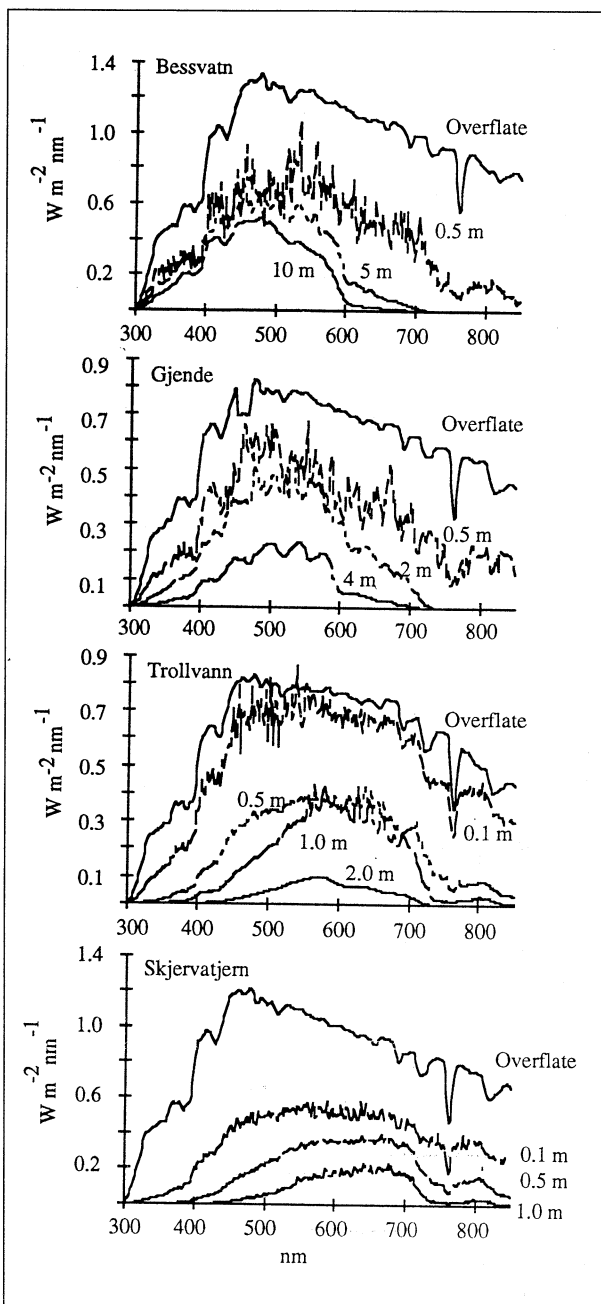
komponenter er mest sensitive for UV-C, mindre for UV-B og lite for UV-A og blått lys, men det finnes eksempler på klare skadeeffekter også av UV-A og lengre bølgelengder. For DNA-skader, ville de beskrevne 300% mer UV-B gi 638 % økning i biologisk effektiv dose, mens "bare" 267 % økning om man ser på hudcelleskader hos fisk. (Disse beregningene gjelder vel og merke på overflaten, og ved en meget dramatisk ozonreduksjon). Det er også vært å merke seg at det ikke er den årlige, akkumulerte dose som er interessant, men dosene på det tidspunkt hvor produksjonen er stor (vår oppblomstring for alger) eller organismene er særlig eksponert (eks. egg og fiskelarver i øvre vannlag). Ozonlaget er svært fluktuierende, og en kortvarig episode med lave ozonverdier og høy UV kan gi større effekter enn noen få prosent avvik fordelt over uker eller måneder.

### **UV-stråling i vann:**

For akvatiske systemer blir et helt sentralt spørsmål hvor dypt ned UV-lyset trenger. Er det her snakk om overflateeffekter, eller vil store deler av den produktive sonen berøres? Det har lenge vært kjent at UV-B trenger dypt ned i den produktive sonen i de fleste marine områder, og det er målt klare effekter ned til 10-20 m (Karentz et al 1990, Smith et al. 1992). I Antarktis ble det funnet at "ozonhullet" bidro til ca 10-20 % lavere algeproduksjon integrert over de øverste 10 metre, men generelt er det ikke blitt påvist noen dramatiske økosystemendringer her. I ferskvann har det lenge vært antatt at det høye

innholdet av organisk materiale effektivt blokkerer for UV-strålene, noe som er delvis riktig. Selv små mengder oppløst organisk materiale gir en rask reduksjon i UV, og spesielt humus absorberer UV meget effektivt. Allerede ved verdier på 1-2 mg organisk C/l, vil man knapt registrere UV under 0.5 m, og i det vi vanligvis kalles humusvann, vil nesten all stråling stoppes i de øvre 0.1 m. Faktisk kan overflatefilmen i slike vann filtrere ut over halvparten av de korte bølglengdene. Kommer vi derimot til klare sjøer, og spesielt fjellvann

*Fig. 2. Eksempler på spektralfordeling i ulike innsjøtyper. Bessvatn: en ekstremt klar, oligotrof sjø; Gjende: en oligotrof, brepåvirket sjø; Trollvann: en mesotrof lavlandssjø og Skjervatjern: en sterkt humuspåvirket lavlandssjø. Merk de ulike dybene i de forskjellige lokalitetene.*



eller arktiske lokaliteter er bildet et helt annet. Her kan UV-gjennomtrengeligheten være den samme som i lavproduktive havområder, og økologien i disse lokalitetene er allerede i dag betydelig influert av UV, og klart i faresonen ved økte stråledoser. For sammenlikning er undervanns spektralfordeling og doser vist for ulike ferskvannslokaliteter i Fig. 2. Noen av de klareste lokaliteter i verden finner man i arktiske områder. Målinger i flere lokaliteter på Svalbard viser omtrent samme optiske egenskaper som Bessvatn. Når de i tillegg da er svært grunne (ofte bare 1-2 meter) og ligger i et område hvor økte UV-doser kan forventes, er dette spesielt interessante lokaliteter i overvåkningsammenheng. Vi skal komme tilbake til dette senere.

Det er knyttet bekymring til effekter på de marine næringskjeder, og spesielt på mulige effekter på planktonalgene i havet. Dette av to grunner: for det første fordi planktonalgene utgjør fundamentet for de marine næringskjeder og all produksjon av liv i hav. For det andre fordi algeproduksjonen i havet utgjør et viktig sluk for atmosfærisk CO<sub>2</sub>, og dermed antas å bremse drivhuseffekten. Spesielt gjelder dette de nordlige havområder, som er viktige områder for dypvannsdannelse. Noen få prosent reduksjon i fotosynteseaktiviteten her vil kunne gi store utslag i det globale karbonbudsjett. Her finner vi altså en direkte tilknytning mellom ozonlags- og klimaproblematikken. Et viktig moment her er at enkelte algegrupper er klart viktigere enn andre. Også andre organismegrupper i vann er sensitive

for UV-lys. Nylige undersøkelser viser klare effekter av naturlig UV-stråling på bakterier, en organismegruppe som også har en nøkkelrolle for stoffomsetningen i havet. Virus, som også spiller en meget viktig rolle for omsetning i vann, mangler de vanlige reparasjonsenzymene for stråleskader, og burde være enda mer utsatt. Dyreplankton, frittflytende fiskeegg og fiskeyngel er også vist å være svært ømfintlige for økte UV-doser, og både i hav og klare ferskvannslokaliteter synes mange organismer å ha sin vertikale utbredelse regulert av UV-lys. Endelig skal det nevnes at UV-lys har betydelige indirekte effekter i vann ved at det kan frigjøre metaller som normalt er uskadeliggjort i organiske bindinger. Det marine aspekt, og spesielt effekter på algene, vil presenteres i en annen sammenheng, derfor skal vi her fokusere på mulige effekter i ferskvann.

### **Indirekte effekter:**

Vi skal se litt både på indirekte og direkte effekter av UV-stråling. I drikkevannssammenheng har man lenge kjent til den mulige helsemessige risiko ved UV-bestråling av humusholdig vann, dels på grunn av dannelse av frie radikaler og andre sterke oksidanter som H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, men også på grunn av faren for frigivelse av kompleksbundne metaller eller giftstoffer. Dette er faktorer som også kan ha konsekvenser for de organismene som lever i vann. Gjessing og Källqvist (1993) demonstrerte klart at høye doser av UV-C hadde negative langtidseffekter på alger som ble inokulert etter at humusvannet var

bestrålt. Også ved naturlige stråledoser vil den betydelige energimengde som bremses opp i overflaten gi store konsentrasjoner av radikaler, oksidanter, karbonmonoksid, antakelig frie metaller, men også kunne gi en oppspalting av store humuskomplekser til mindre, og oksidasjon av organisk bundet nitrogen og fosfor til biotilgjengelig form. Et tilsvarende bestrålingsforsøk med naturlige stråledoser, bekreftet at UV-bestråling potensielt kan virke sterkt hemmende på planteplankton (Hessen & Van Donk 1994). Her ble ikke funnet noen effekter på bakterier eller dyreplankton, men det er også vist at naturlige vannbakterier kan bli hemmet tilsvarende (Lund & Hongve 1994). Mens direkte stråling virker sterkt hemmende på overflatebakterier i humusvann, vil frigjøring av næringssalter og organiske molekyler klart stimulere bakterievekst (Hessen et al. 1995a). Det er her altså snakk om komplekse mekanismer. Det skal også nevnes at UV i sterk grad virker direkte oksiderende på humus, molekylstørrelsen avtar ved bestråling, noe vil oksideres direkte til CO<sub>2</sub>, men også en betydelig del vil bli ufullstendig oksidert til det svært giftige karbonmonoksid.

### **Direkte, biologiske effekter:**

Den direkte effekt på alger har vært mest fokusert, og er kjent fra marine lokaliteter fra langt tilbake. Norske undersøkelser viste meget klare effekter ved eksponering av grønnalgen *Chlamydomonas reinhardtii* for naturlig lys. Forsøk med kvartsflasker (som slipper igjennom UV-B), kvartsflasker

med filter (blokkerer UV-B, men ikke UV-A) og glassflasker (blokkerer det meste av også UV-A), viste at særlig UV-B, men også UV-A ga redusert fosforopptak og vekst, tap av flageller og sterk pigmentbleking (Hessen et al. 1995b). Spesielt inaktivering eller tap av flageller synes å være en sensitiv parameter. Det er også vist at bestrålte alger øker i størrelse, får tykkere cellevegg og blir mindre beitebare for dyreplankton (van Donk & Hessen 1995). Marine undersøkelser har vist at små alger er mer sensitive enn store (Behrenfeld et al. 1992), og at økt UV kan gi en dreining i retning av større alger (Karentz et al. 1994).

Mens alger tross alt er avhengig av lys, og har utviklet avanserte beskyttelsesmekanismer mot den skadelige delen av lysspekteret, så kan man forvente at dyr generelt er mer sensitive. Bothwell et al. (1994) viste faktisk at selv om alger direkte skades av UV, så kan de likevel få høyere vekst i naturlige systemer med UV enn uten UV (men selvsagt med synlig lys). Dette fordi de organismene som beitet algene var de som ble mest skadelidende ved UV-eksponering. I Norge er utført en del forsøk med dyreplankton, og spesielt varianter av krepsdyrplanktonet *Daphnia* synes å være en velegnet modellorganisme. Det er vår viktigste gruppe av ferskvannsplankton, de er utbredt overalt, også i arktiske og alpine lokaliteter hvor de kan være helt dominerende, de er lette å holde i kultur, og de har ukjønnnet formering som er en fordel når man vil studere genetiske effekter og mutasjoner. De er også van-

lig bruk i toksisitetstester. Videre viser de noen interessante tilpasninger til UV-stråling også i naturen. I lavlandet er alle arter og former av *Daphnia* lyse eller nærmest gjennomsiktige for å være minst mulig synlige for fisk. I høyfjellet og på Svalbard finnes man to varianter side om side. Her opptrer den vanlige, lyse eller upigmenterte formen i lokaliteter med noe innslag av organisk materiale og dermed en viss UV-absorbans, mens i de helt klare lokalitetene finnes svært ofte helt mørke, nesten svarte individer av samme art. I høyfjellet finner man denne egenskapen hos arten *Daphnia longispina*, på Svalbard ser vi det hos *Daphnia pulex*. Den mørke skalfargen er melanin, et av de pigment vi også benytter oss av som UV-beskyttelse. Laboratorieforsøk viser klart at den svarte varianten er mer tolerant ovenfor UV-lys, men melaninsyntesen krever mye energi og har sin pris. Ved lavere lysintensiteter er den lyse normalvarianten konkurransemessig overlegen. Det er visse genetiske forskjeller mellom de lyse og de svarte individene, og det er ikke slik at de lyse kan bli mørke om man utsetter de for mer lysstress. Det dreier seg her om en fiksert mutasjon som i høy grad illustrerer at dagens UV-nivå er en betydelig stressfaktor. Man kan også se at plankton i slike lysutsatte lokaliteter vandrer ned bot bunnen i perioder hvor lysintensiteten er sterk. Disse *Daphnia*-samfunnene er velegnet både i overvåkningsammenheng og til eksperimentelle forsøk med studier av f.eks. genskader og mutasjoner.

Det er også utført forsøk med marine

arter av dyreplankton som viser at selv en moderat økning av UV utover den dosen de mottar naturlig, gir økt dødelighet. Hoppekreps, som dominerer blant det marine krepsdyrplankton, bruker røde eller blå karotenoider som lysbeskyttende pigment. For fisk er det også eksperimentelt og i oppdrettsanlegg påvist klart negative effekter av UV-stråling, med ulike celledskader, hudkreftliknende symptomer og nedsett immunforsvar som de viktigste responser. Flere marine fiskeslag er klart i faresonen med økte UV-doser. Sildeyngel har ofte sin hovedutbredelse i de øverste 10 meter, og også arter som torsk og hyse har pelagisk yngel. Ellers er det åpenbart at effekter lavere ned i næringskjeden også vil påvirke fisken.

Et sentralt spørsmål blir om ulike akvatiske dyregrupper er i stand til å registrere en selektiv økning i UV-stråling, og dermed søke dypere. Noen arter er iallfall i stand til å registrere UV-A, men det synes som mange arter ikke direkte har sensorer for UV-B. Hvor fort kan arter tilpasse seg? Det er sannsynlig at arter ved lavere breddegrader, og spesielt tropiske arter har en betydelig høyere UV-toleranse enn arktiske arter, men evolusjonære tilpasninger tar lang tid, spesielt hos høyere organismer. Kaldtvannsarter er sannsynligvis også mer utsatt fordi de cellulære reparasjonsmekanismene (som "skjøting" av skadet DNA) går tregere ved lave temperaturer. Produksjonen er også betydelig høyere i arktiske og antarktiske farvann, slik at en UV-indusert reduksjon av akvatisk produksjon klart vil slå sterkest ut her. Over tid vil det

kunne skje en tilpasning ved at utbredelsen av alle organismer flyttes dyper. Dette betyr imidlertid mindre av det synlige lyset, og ofte lavere temperaturer, slik at den totale produksjonen i alle tilfelle vil bli redusert.

Som konklusjon kan det fastslås at UV-stråling i utgangspunktet er en meget viktig økologisk faktor i vann, og at artssammensetning, produksjon og utbredelse spesielt i klare lokaliteter i betydelig grad styres av denne strålingen. Økte stråledoser må betraktes som en negativ påvirkning, og vi vet lite om de effekter som kan ventes både av en systematisk ozonsvekkelse eller kortvarige episoder med lave ozonverdier. Erfaringene fra Antarktisk indikerer en noe nedsatt primærproduksjon, men ikke dramatiske økosystemeffekter så langt. På grunn av forskjeller i artssammensetning og økosystemstruktur kan imidlertid ikke disse erfaringene uten videre overføres til Arktiske farvann eller ferskvannslokaliteter.

## Referanser

Behrenfeld, M.J. Hardy, J.T. and Lee, H. 1992. Chronic effects of Ultraviolet-B radiation on growth and cell volume of *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyceae). *J. Phycol.* 58: 75.7-760.

Bothwell, M.L., Sherbot, D. and Pollock, C.M. 1994. Ecosystem response to solar Ultraviolet-B radiation: influence on trophic level interactions. *Science* 265: 97-100.

Hessen, D.O. 1993. DNA-damage and pigmentation in alpine and arctic zooplankton as bioindicators of UV-

radiation. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25: 482-486.

Hessen, D.O. 1994. UV-B responses in *Daphnia*. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 43: 185-195.

Hessen, D.O., Van Donk, E. and Andersen, T. 1995. Growth responses, P-uptake and loss of flagella in *Chlamydomonas reinhardtii* exposed to UV-B. *J. Plankton Res.* 17: In press.

Hessen, D.O. and van Donk, E. 1994. W-radiation of humic water; effects on primary and secondary production. *Water, Air and Soil Poll.* 74: 1-14.

Karentz, D., Cleaver, J.E., and Mitchell, D.L. (1991) Cell survival characteristics and molecular responses of antarctic phytoplankton to ultraviolet-B radiation. *J. Phycol.* 27: 326-341.

Karentz, D. and Lutze, L.H. (1990) Evaluation of biologically harmful ultraviolet radiation in the Antarctica with a biological dosimeter designed for aquatic environments. *Limnol. Oceanogr.* 35: 549-561.

Kerr, J.B. and McEko, C.T. 1993. Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science* 262: 1032-1034.

Lund, V. & Hongve, D. 1994. Ultraviolet radiated water containing humic substances inhibits bacterial metabolism. *Water Res.* 28: 1111-1116.

Scully, N.M. & Lean, D. 1994. UV-absorbance of DOC in fresh waters. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 43: 135-144.

Smith, R.C., Prezelin, B.B., Baker, K.S., Bidigare, R.R., Boucher, N.P., Coley, T., Karentz, D., MacIntyre, S., Matlick, H.A., Menzies, D. Ondrusek, M. Wan, Z and Waters, K.J. (1992) Ozone



depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science* 255: 952-959.  
Van Donk, E. and Hessen, D.O. 1995.

Reduced digestibility of UV-B stressed and nutrient-limited algae by *Daphnia magna*. *Hydrobiologia* in press.