

GÜNTHER WEISE* und ALBRECHT, H. GNAUCK*

TOXIKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AN SUBMERSEN MAKROPHYTEN IN FLIESSGEWÄSSERN AUF DER GRUNDLAGE INFRAROTGASANALYTISCHER MESSUNGEN (IRGA-METHODIK)

Infrarotgasanalytisch erhaltene Gänge des CO₂-Umsatzes von *Fontinalis antipyretica* im 24-Stunden-Zyklus werden im Parameterraum dargestellt und diskutiert. Am Beispiel einer Cu²⁺- und Zn²⁺-Belastung wird gezeigt, daß unter dem Aspekt der Stabilität des CO₂-Gaswechsels Grenzwerte der Belastbarkeit ermittelt werden können. Gewässerökologische Aspekte der vorliegenden Untersuchungen werden als Probleme des Umweltschutzes dargestellt.

1. EINLEITUNG

Toxikologische Untersuchungen des Gaswechsels submerser Makrophyten schaffen Voraussetzungen, diese Komponenten eines Gewässerökosystems hinsichtlich ihres Indikationswertes für die Wasserqualität zu erschließen. Als Kriterium hierzu wird der Gasstoffwechsel, d.h. der photosynthetische Sauerstoffeintrag und der respiratorische Sauerstoffverbrauch im 24-Stunden-Zyklus, herangezogen.

2. MATERIAL UND METHODIK

Die Untersuchungen wurden an dem untergetaucht lebenden Wassermoose *Fontinalis antipyretica* L. durchgeführt. Es wurde natürlichen Fließgewässern der weiteren Umgebung Dresdens entnommen und vor Untersuchungsbeginn in ständig gut belüfteten Aquarien im normalen Tag-Nacht-Rhythmus gehalten.

Die Untersuchung des Gasstoffwechsels erfolgte infrarotgasanalytisch unter Einsatz eines IRGA-Gerätes der Fa. Zimmermann, Leipzig.

* G. WEISE Doz. Dr. und A.H. GNAUCK Dipl.-Math., Sektion Wasserwesen der Technischen Universität Dresden, Bereich Hydrobiologie. DDR-8027 Dresden, George-Bähr-Straße 1.

Die Anwendung der Infrarotgasanalytik setzt den Einschluß der Untersuchungsobjekte in Reaktionsgefäße voraus, die mit Wasser und Luft Zweiphasensysteme darstellen. Wird die in das Meßsystem eingetragene Luft in einem geschlossenen Kreislauf gehalten, führt die assimilatorische Tätigkeit des im Reaktor eingeschlossenen Untersuchungsmaterials zu einem Absinken des CO_2 -Gehaltes, bis dieser zum begrenzenden Faktor wird. Dies verhindert ein weiteres Absinken des CO_2 -Gehaltes im System: die in einem an den Infrarotgasanalysator angeschlossenen Registriergerät aufgezeichnete Punktkurve erreicht einen unteren Plateauwert, anschließende Nachtatmung läßt entsprechend den CO_2 -Spiegel wieder auf einen oberen Plateauwert ansteigen. Analog den Befunden von Polster [6] an Landpflanzen, sind zeitsynchrone Umschaltungen des CO_2 -Stoffwechsels im Licht-Dunkel-Wechsel auch Kriterium des vitalen Zustandes submerser Wasserpflanzen (Auerbach, Prüfer und Weise [1]). Eine Quantifizierung des infrarotgasanalytisch erfaßten CO_2 -Umsatzes setzt das zeitparallele „Mitlaufen“ eines objektfrei gehaltenen Kontroll-Reaktors voraus. Um diese Voraussetzung zu erfüllen, muß ein offener Luftstrom gewählt werden, der von einer leistungsstarken Pumpe (z.B. Doppelkolbenpumpe) zunächst in ein Druckausgleichsgefäß, von dort in 6 parallel geschaltete Reaktoren gedrückt wird, um über Trockensysteme, Strömungsmesser und Ventillflaschen in den Gasumschalter zu gelangen. Dieser gibt — zeitlich vom Registriergerät gesteuert — im Minutenzyklus jeweils einen Gasweg frei, der in die Analysenkammer des IRGA-Gerätes gelangt und nach der Analyse entweicht. Um erhebliche Schwankungen in der Registrierung der aufgezeichneten Analyseergebnisse zu vermeiden, hat sich die Beschickung der Vergleichsküvette des IRGA-Gerätes mit „Außenluft“ aus dem Druckausgleichsgefäß bewährt. Nach Eichung der Ausschläge des Registriergerätes unter Verwendung definierter Eichgase sind die erhaltenen CO_2 -Umsatzwerte als jeweilige Differenzen gegen „Kontrollluft“ in $\text{mg CO}_2/\text{gTG}$ und Stunde angebbbar.

3. ERGEBNISSE

3.1. VERSUCH MIT STUFENFÖRMIG FALLENDER SCHWERMETALLIONEN-BELASTUNG (Abb. 1)

Das Versuchsobjekt *Fontinalis antipyretica* L wurde zunächst (1. Versuchstag, 10. 9. 74) in 3 parallel geschalteten Versuchsvarianten unter Laborbedingungen im „natürlichen“ Tag-Nacht-Gang des Lichtgenusses vorwiegend heiterer Spätsommertage unbelastet untersucht. Hierbei sind nur geringfügige Unterschiede des gasstoffwechselphysiologischen Verhaltens der Varianten untereinander feststellbar. Diese Aussage gilt auch für die annähernd gleichzeitige Erreichung und Über- bzw. Unterschreitung des Lichtkompensationspunktes (Nettoassimilation $A_N = 0!$).

Mit der Herstellung einer stufenförmigen Belastung ($a = 40 \text{ mg}/\text{dm}^3 \text{ Cu}^{2+}$ als CuCl_2 bzw. $40 \text{ mg}/\text{dm}^3 \text{ Zn}^{2+}$ als ZnCl_2) werden sofort starke gasstoffwechselphysiologische Schwankungen im Vergleich zur Kontrolle deutlich. Die erhöhte Varianz

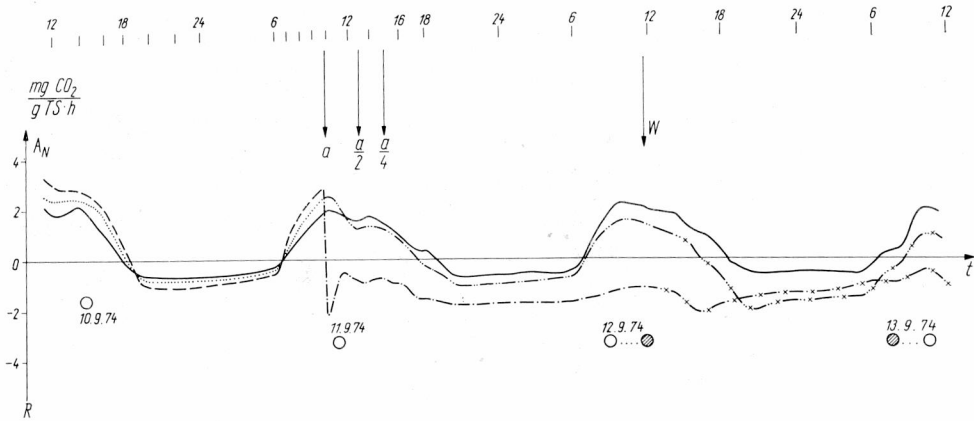


Abb. 1. Tagesgänge des CO₂-Umsatzes des submersen Wassermooses *Fontinalis antipyretica* L natürlichen Tag-Nachtwechsel des Lichtangebotes unter Laborbedingungen (Dresden) A_N – Nettoassimilation, R – Atmung (nächtliche Dunkelatmung und schwermetallsalzinduzierte-Lichtatmung); O – Kompensationspunkt bei Gleichheit von A_N und R. Symbole der Beleuchtungsverhältnisse: ○ – heiter; ● – schwach bedeckt

Rys. 1. Dobowe wydzielanie CO₂ przez *Fontinalis antipyretica* L w naturalnych dziennie-nocnych zmianach przy naświetlaniu w warunkach laboratoryjnych (Drezno); w warunkach malejącego w czasie trwania doświadczeń obciążenia metalami ciężkimi

Oznaczenia: A_N – asymilacja netto, R – oddychanie (w ciemności oraz w świetle, przy obciążeniu metalami ciężkimi), O – punkt kompensacji przy A_N = R, ○ – bezchmurnie; ● – zachmurzenie umiarkowane, W – zaprzestanie dawkowania metali

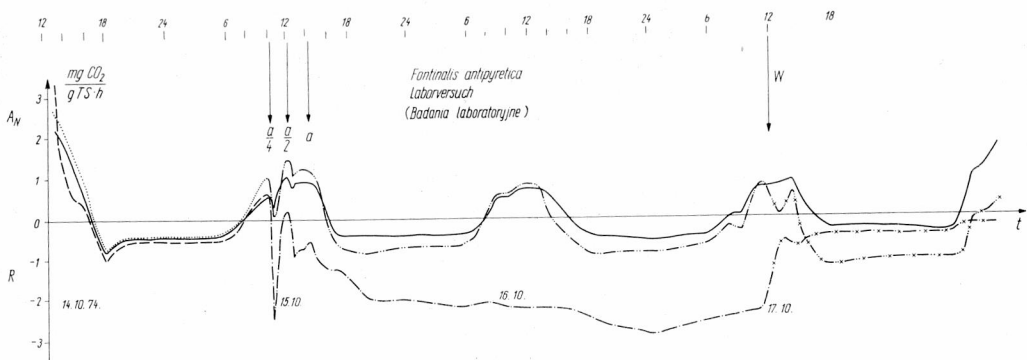


Abb. 2. Tagesgänge des CO₂-Umsatzes von *Fontinalis antipyretica* L im natürlichen Tag-Nachtwechsel des Lichtangebotes spätherbstlicher Trübweatherstage unter Laborbedingungen (Dresden)

Rys. 2. Dobowe wydzielanie CO₂ przez *Fontinalis antipyretica* L przy zachowaniu sekwencji dnia i nocy, późną jesienią w dniach pochmurnych przy naświetlaniu w laboratorium; obciążenie metalami ciężkimi w czasie rośnię (Drezno)

der physiologischen Leistung charakterisiert die Schadstoffwirkung der Schwermetallsalze. Die Zn^{2+} -Variante antwortet dabei auf die Belastung mit einer Depression der Nettoassimilation auf 55% der Ausgangsleistung. Eine Verminderung der Schwermetallsalzkonzentration um $a/2$ (durch teilweisen Austausch des Wasserkörpers in den Reaktionsgefäßen) und schließlich um $3a/4$ führte nur zu schwachen Pulsationen der photosynthetischen Leistung. Die Verschiebung des Lichtkompensationspunktes in einen Bereich höherer Beleuchtungsstärken im Vergleich zur Kontrolle ist Ausdruck einer Schädigung. Diesem bereits Pavletic und Lieth [5] an immergrünen Landpflanzen bei Frostschädigung beschriebenen Kriterium kommt allgemeinere Bedeutung zu, der Effekt steht mit einer Erhöhung der Atmung (Nachtatmung R_D) im Einklang.

Nach Kupfersalzapplikation der Stufe a zeigte sich sofort ein impulsförmiges Absinken der Nettoassimilation bis zu Lichtatmung. Die spätere Verminderung der Belastungsstufe um $a/2$ und $3a/4$ führte zu schwachen Variationen der Atmungsgröße. Auch unter den Beleuchtungsbedingungen des anschließenden Versuchstages (12. 9. 1974; heiter bis halb bedeckt) wurde eine Atmungssenkung festgestellt, der Kompensationspunkt wird nicht mehr erreicht.

Die Überführung des Versuchsmaterials in schwermetallsalzfreies Leitungswasser (12. 9. 1974, 12 Uhr) belegt, daß die Zink-Variante am folgenden Untersuchungstag wieder den Kompensationspunkt überschreitet und eine nettoassimilatorische Leistung erreicht, die bei 50% der im unbelasteten Zustand zu erwartenden Leistung liegt. Unter gleichen Bedingungen erreichte die Kupfer-Variante nicht einmal mehr den Kompensationspunkt. Die schwermetallionen-spezifischen Schädigungen des photosynthetischen Apparates haben bei der Kupfer-Variante irreversiblen, letalen Charakter. Dies wurde auch auf Grund sichtbarer Schädigungen (Chlorophyllabbau!) deutlich. Die zum gleichen Zeitpunkt vorgenommene Rückversetzung in schwermetallfreies Wasser erfolgte bei der Zink-Variante in der Latenzphase, bei der Kupfer-Variante hingegen bereits in der Letalphase. Gasstoffwechselphysiologische Untersuchungen sind in diesem Sinne geeignet, *Grenzwerte der Belastbarkeit* zu ermitteln. Ergänzend zu den in toxikologischen Tests erfaßten objektspezifischen mittleren letalen Konzentrationen (LC 50: Konzentration, bei der unter vergleichbaren Bedingungen 50% der Objekte absterben) lassen sich Schadstoffkonzentrationen als Grenzwerte ermitteln, bei denen unter vergleichbaren Bedingungen die *photosynthetische Leistung* auf 50% absinkt.

3.2. VERSUCH MIT STUFENFÖRMIG STEIGENDER SCHWERMETALLBELASTUNG (Abb. 2)

Das synchrone Parallelschwingen der assimilatorischen und respiratorischen Leistung der zunächst sämtlich unbelasteten Varianten bei nur sehr geringen Leistungsunterschieden (1. Versuchstag, 14. 10. 74) belegt deren gute physiologische Vergleichbarkeit.

Mit der Herstellung der Belastungsstufe $a/4$ ($10 \text{ mg/dm}^3 \text{ Cu}^{2+}$ als CuCl_2 bzw.

10 mg/dm³ Zn²⁺ als ZnCl₂) traten als Sofortreaktionen Depressionen der Nettoassimilation auf. Sie führten bei der Zn²⁺-Variante bis zum Kompensationspunkt, bei der Kupfer-Variante hingegen zu Lichtatmung. Die Überschreitung des assimilatorischen Niveaus der Kontrolle durch die Zink-Variante im weiteren Versuchsverlauf kann als overshoot-Reaktion gedeutet werden. Eine synchrone Reaktion auf weit niedrigerem Niveau tritt auch bei der Kupferbelastung auf. Das bisher stationär arbeitende System wird durch die Schwermetallbelastung in einen Schwingungszustand (System 2. Ordnung) mit Amplitudendämpfung versetzt (asymptotische Stabilität). Das Dämpfungsverhalten (Dämpfungsfaktor $D > 1$) wird jedoch durch eine weitere Erhöhung der Zink- und Kupferionenkonzentration auf $a/2$ gestört, wobei die Nettoassimilation erneut absinkt — bei der Kupfer-Variante bis zur Lichtatmung.

Unter den Bedingungen der Belastungsstufe a zeigte sich bei Zn²⁺ erhöhte Atmung gegenüber der unbehandelten Kontrolle. Folge davon war wiederum Verschiebung des Kompensationspunktes in den Bereich höherer Beleuchtungsstärken. Die Kupfer-Variante verblieb hingegen gantztätig im Bereich starker Atmung, d.h. negativer CO₂-Bilanz.

Die Rückversetzung beider Schwermetallvarianten in Leitungswasser am 4. Versuchstag (17. 10. 74) belegt — in voller Übereinstimmung mit dem Versuch bei stufenförmig fallender Schwermetallbelastung (Abb. 1) — die Reversibilität der gasstoffwechselphysiologischen Schädigung bei Zink und ihre Irreversibilität bei Kupfer. Die Darstellung der Tag-Nacht-Kurven des CO₂-Umsatzes im mehrtägigen Versuchsverlauf im Parameterraum gestattet Aussagen über die Stabilität des Gasstoffwechsels. Unter Stabilität wird dabei die Fähigkeit eines Systems verstanden, Struktur und Funktion gegenüber äußeren Störungen innerhalb gewisser Grenzen aufrecht zu erhalten. Es muß aber zwischen mathematischer und ökologischer Stabilität unterschieden werden. Ökologische Stabilität bedeutet stets mathematische Stabilität. Eine Umkehrung des Satzes gilt nicht allgemein (Gnauck [2]). Analog zur Untersuchung der Stabilität linearer Systeme mit Rückkopplung muß bei nichtlinearen Systemen untersucht werden, ob kleinen äußeren Kräften oder Gleichgewichtsabweichungen (durch Umwelteinflüsse hervorgerufen und durch Anfangsbedingungen ausgedrückt) auch „kleine“ Reaktionen entsprechen, die in entsprechenden Lösungen der Systemgleichungen ihren Ausdruck finden. Bei linearen Systemen führt man dieses Problem auf eine Untersuchung der Beschränktheit oder Stetigkeit der Resolvente der das System beschreibenden Gleichung. Sei A (Systemoperator, gibt das Übertragungsverhalten des Systems an) ein linearer Operator im HILBERT-Raum H , $M \subset H$ eine lineare Mannigfaltigkeit (Menge). Es gilt im stationären Fall

$$Au - \lambda u = 0 \quad (u \in M, \lambda \text{ — komplexe Zahl})$$

bzw. mit Hilfe des Einheitsoperators E

$$(A - \lambda E)u = 0,$$

wobei $Eu - u = 0 \quad (u \in H)$.

Der Operator $(A - \lambda E)^{-1}$ heißt Resolvente von A , falls λ regulär ist.

Bei nichtlinearen Systemen kann dagegen das System (Gewässer) für kleine Amplituden der Umwelteinflüsse stabil sein, jedoch bei Anwachsen der Amplituden instabil werden (vgl. Uhlmann, Weise und Gnauck [8]).

Das genannte System kann durch die Operatorgleichung

$$\mathbf{y}(t) = T[\mathbf{x}(t)]$$

dargestellt werden, wobei T der Systemoperator, $\mathbf{y}(t)$ der Vektor der Ausgangssignale und $\mathbf{x}(t)$ der Vektor der Eingangssignale (Umwelteinflüsse) sind. Das System ist genau dann stabil, wenn jedes beschränkte zulässige Eingangssignal $\mathbf{x}(t)$ ein beschränktes Ausgangssignal $\mathbf{y}(t)$ zur Folge hat:

$$|\mathbf{x}_i(t)| < K < \infty \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

und

$$|\mathbf{y}_i(t)| < L < \infty \quad (i = 1, 2, \dots, l)$$

für alle t .

Die in den Abbildungen 1 und 2 dargestellten Stoßbelastungen lassen sich als Delta-Distribution (δ -Impuls) schreiben:

$$\mathbf{y}_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\tau) \delta(t - \tau) d\tau.$$

Approximiert man dieses Integrals durch eine Rechteckfunktion:

$$\mathbf{r}(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 < t < e \\ e & \\ 0 & \text{für } e < t < 0 \end{cases}$$

(e — Rechteckbreite)

mit

$$\lim_{e \rightarrow \infty} \mathbf{r}(t) = \delta(t),$$

so gilt

$$\mathbf{y}(t) \approx \sum f(\tau_i) r \Delta\tau(t - \tau_i) d\tau.$$

Für die Impulsantwort $h(t, \tau)$ gilt

$$h(t, \tau) = T[\delta(t - \tau)],$$

deren Verlauf man in verzerrter Form in der Abb. 1 zwischen den Belastungsstufen a und $a/2$, in der Abb. 2 zwischen den Belastungsstufen $a/4$ und $a/2$ findet. Setzt man $\mathbf{x}(t)$ als stetig voraus, so ist

$$\mathbf{y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{x}(\tau) h(t, \tau) d\tau$$

und für lineare, zeitvariante, kausale Systeme

$$h(t, \tau) = A(t)\delta(t-\tau) + he(t, \tau),$$

wobei $he(t, \tau)$ den δ -impulsfreien Teil der Systemantwort darstellt.

Als Stabilitätskriterium erhält man

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h(t, \tau)| d\tau < R < \infty$$

falls die Impulsstärke $A(t)$ für alle t betragsbeschränkt ist. Dann ist

$$|y(t)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t, \tau) d\tau \right| \leq \int_{-\infty}^{\infty} |x(\tau)| \cdot |h(t, \tau)| d\tau.$$

Da

$$|x(t)| < K,$$

gilt

$$|y(t)| < K \int_{-\infty}^{\infty} |h(t, \tau)| d\tau$$

und somit

$$|y(t)| < K \cdot R.$$

Für das betrachtete System erhält man

$$|y(t)| < 3, \text{ (Abb. 1) und}$$

$$|y(t)| < 3, \text{ (Abb. 2).}$$

Fontinalis antipyretica zeigt im mehrtägigen Untersuchungsverlauf in *schwermetallfreiem Leitungswasser* diese *Stabilität der CO₂-Bilanz* beispielhaft: Untervergleichbaren Photosynthese- und Respiurationsbedingungen beschreiben die für aufeinander folgende Versuchstage ermittelten Kurven eng beieinander liegende Bahnen. Dabei werden zu gleichen Zeitpunkten aufeinander folgender Tage weitgehend gleiche physiologische Leistungen erzielt. Im 24-Stunden-Zyklus überwiegen unter günstigen Beleuchtungsbedingungen des Tages die photosynthetischen Leistungen stark gegenüber der Dunkelatmung: 24-Stunden-Bilanz $A_N/R_D > 1$. Dies gilt umso mehr, je günstiger die Photosynthesebedingungen sind und je länger sie im 24-Stunden-Zyklus wirksam sind (vgl. Abb. 4 oben). Eine Verbesserung der Photosynthesebedingungen gegenüber den Vortagen (Trübwetertagen, Abb. 4 oben) führt in dieser Darstellung zu einem „Ausbrechen“ nach „oben“, d.h. zu besseren Photosyntheseleistungen in der Zeiteinheit.

Als Folge der Zinkbelastung (Abb. 3, Mitte) gleitet die photosynthetische Leistung unverzüglich auf ein tieferes Niveau ab. Umgekehrt steigt die Respiration in der Nacht auf ein höheres Niveau im Vergleich zur Nachtatmung des Vortages, die „schwermetallfrei“ durchlaufen wurde. Hieraus folgt eine Verschiebung der 24-

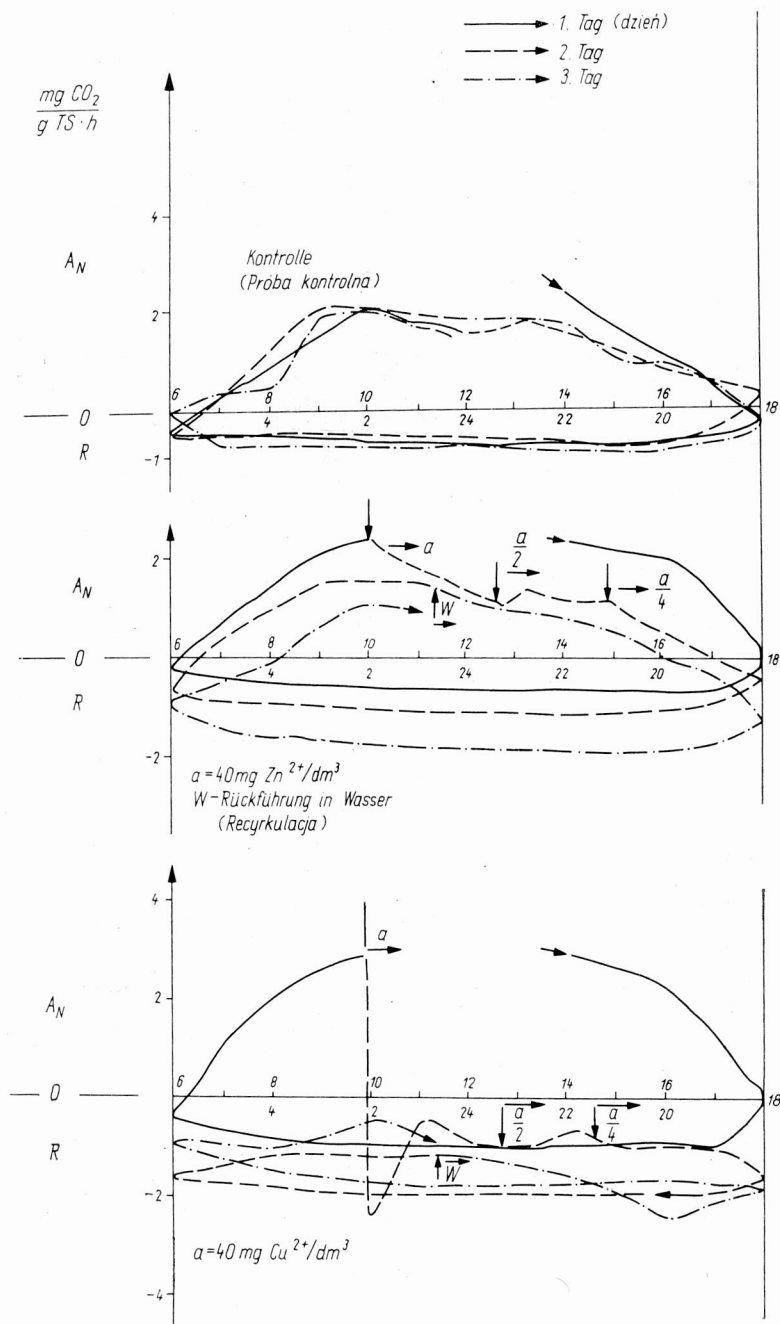


Abb. 3. Darstellung der Abb. 1 im Parameterraum. Oben: Unbelastete Kontrolle; Mitte: Zn^{2+} -, unten: Cu^{2+} - Belastung bei fallenden Konzentrationsstufen; W – Zeitpunkt der „Rückversetzung“ in giftfreies Leitungswasser; O – heiter, klar

Rys. 3. Dobowe cykle asymilacyjno-respiracyjne dla *Fontinalis antipyretica* L przy dominacji dni bezchmurnych (dane dośw. z rys. 1); przewaga dni pogodnych; O – jasno, pogodnie

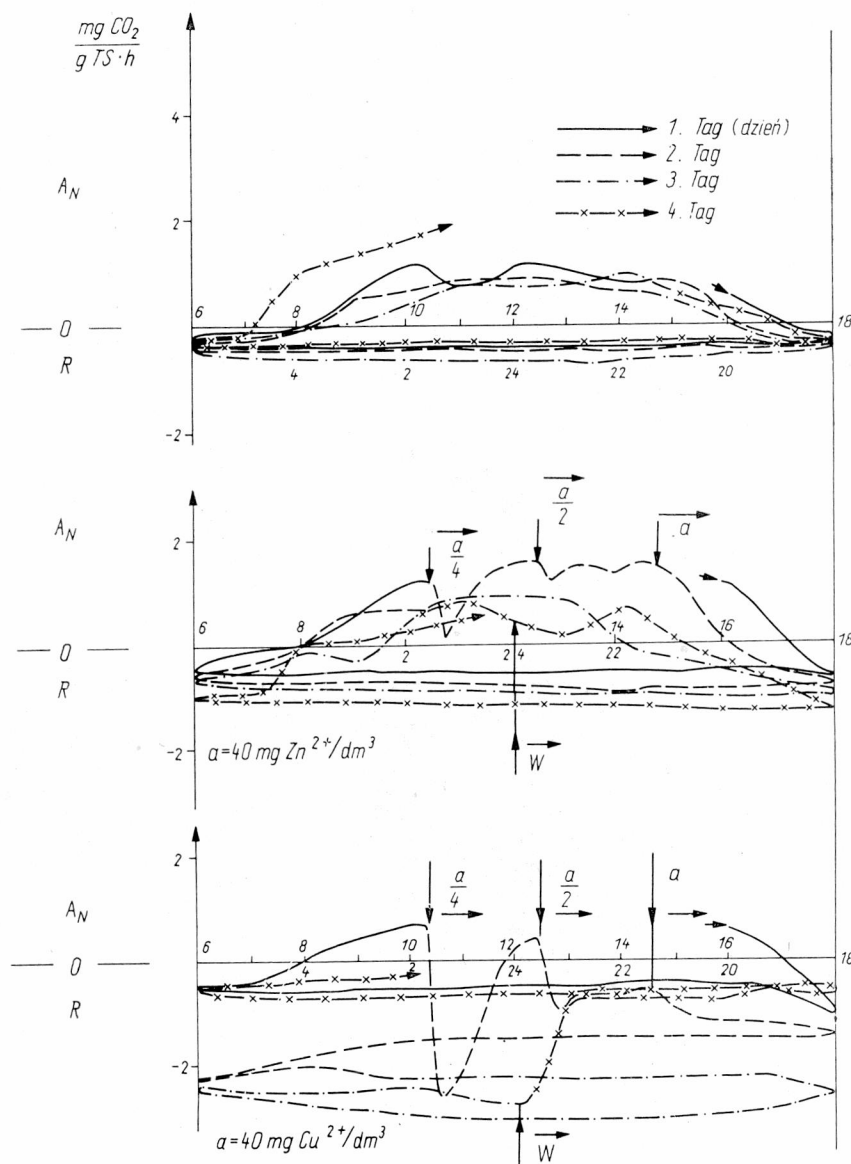


Abb. 4. Darstellung der Abb. 2 im Parameterraum. Oben: Unbelastete Kontrolle; Mitte: Zn^{2+} -, unten: Cu^{2+} -Belastung bei steigenden Konzentrationsstufen; ● — trüb, bedeckt

Rys. 4. Dobowe cykle asymilacyjno-respiracyjne dla *Fontinalis antipyretica* L przy dominacji dni o dużym zachmurzeniu (dane doświadczalne z rys. 2)

Stunden- CO_2 -Bilanz zugunsten der Atmung, d.h. die Verminderung des Quotienten A_N/R_D . Da jedoch hier am Tage noch assimiliert wird, ist die eingetretene Schwermetallschädigung reversibel. Dies ist bei der untersuchten Kupfer-Variante nicht mehr der Fall (Abb. 3 unten). Hier verschiebt sich der gesamte CO_2 -Umsatz im 24-Stunden-

Zyklus ausschließlich auf die Atmungsseite. Die spätere Überführung des Versuchsmaterials in giftfreies Leitungswasser vermag hieran nichts mehr zu ändern.

Ein durchaus vergleichbares Bild zeigten die Untersuchungen bei stufenförmig steigender Schwermetallbelastung (Abb. 4). „Unbelastet“ ergaben sich bei schwachen Beleuchtungsstärken trüber Spätherbsttage (Oktober 1974) bei zwar geringer Photosyntheseleistung noch A_N/R_D -Werte > 1 (im 24-Stunden-Zyklus: $\sum A_N > \sum R_D!$). Als Folge der Zinkbelastung verschieben sich, wie der Kurvenverlauf des 3. Versuchstages im Parameterraum zeigt, diese Quotienten zugunsten der Atmung: $\sum A_N < \sum R_D!$ Entsprechende Kupferbelastung wirkt letal, wie der Verlust der Stabilität des gesamten CO_2 -Umsatzes auch nach „Rückversetzung“ in giftfreies Wasser belegt.

Für das Gewässerökosystem bedeutet die Verschiebung der Quotienten A_N/R_D im 24-Stunden-Zyklus auf Werte < 1 vermehrte Sauerstoffzehrung gegenüber photosynthetischem Sauerstoffeintrag durch die betreffenden pflanzlichen Komponenten des Ökosystems. Damit werden zugleich Bedingungen eingeleitet, unter denen das Fließgewässer seinen Übergang in den heterotrophen Zustand vollzieht.

4. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Abwasserbelastete Gewässer sind Gemische aus mehreren Substanzen mit unterschiedlicher Wirkung. Ein Kriterium der toxischen Wirksamkeit solcher Verbindungen sind zeitlich verzögerter und gehemmter mikrobieller Abbau organisch abbaubarer Substanz sowie veränderte physiologische Leistungen von pflanzlichen Organismen und von Wassertieren (z.B. *Paramecium*, *Tubifex*, *Daphnia*; Fische) gegenüber unbelasteten Gewässern (zusammenfassende Darstellung bei Uhlmann [8]). Dabei verdienen vollautomatische, selbstregistrierende Bestimmungen des CO_2 -Stoffwechsels submerser Makrophyten besondere Beachtung. Die Anwendbarkeit der hoch empfindlichen infrarotgasanalytischen Bestimmung des CO_2 -Umsatzes bei toxischer Belastung ist für submerser Wasserpflanzen unter Laborbedingungen von Prüfer und Auerbach (vgl. Auerbach, Prüfer und Weise [1]) experimentell geprüft und bestätigt worden. Unter Einsatz eines fahrbaren IRGA-Labors haben neuerdings Horbach und Hornig (Horbach, Hornig und Weise [3]) den CO_2 -Stoffwechsel submerser Makrophyten im Fließgewässer unter flußökologischen Bedingungen bei toxischer Belastung untersucht.

Auf Grund einer ausgeprägten Tag-Nacht-Rhythmik, die sich in sinusförmigen Schwingungen der Photosynthese- und Respirationsaktivität ausdrückt, beeinflussen Makrophyten im Variationsbereich ihrer entwickelten Biomasse und des an ihrem Wuchsort verfügbaren Lichtgenusses den Sauerstoffhaushalt im Gewässer. Bei günstigem Lichtangebot und relativ geringer pflanzlicher Biomasse — es bestehen hier hohe Amplituden des CO_2 -Umsatzes — wird gantztätig durch überwiegenden photosynthetischen Sauerstoffeintrag die Sauerstoffsättigungskonzentration im Ge-

wässer wesentlich überschritten (Nacht-Minima $> 10 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$). Andererseits führt die Kombination von hoher pflanzlicher Biomasse mit nur geringem Lichtangebot zu verminderten Tag-Nacht-Amplituden des CO_2 -Umsatzes bei ganztäglich wesentlicher Unterschreitung der Sauerstoffsättigungskonzentration im Gewässer.

Da die photosynthetische CO_2 -Bindung mit Sauerstofffreisetzung, umgekehrt die respiratorische CO_2 -Entbindung mit Sauerstoffverbrauch verbunden ist, sind die mit Hilfe der IRGA-Methodik ermittelten CO_2 -Umsatzraten zugleich Kenngrößen des Sauerstoffhaushaltes im Gewässer, der für die Vorgänge der aeroben Selbstreinigung im Fließgewässer die zentrale Rolle spielt (Knöpp [4]). Bei respiratorischen Quotienten von 1, wie sie von Prüfer und Auerbach [1] für das Wassermooos *Fontinalis antipyretica* nachgewiesen wurden, sind die CO_2 -Umsatzgrößen auf photosynthetischen Sauerstoffeintrag und respiratorischen Sauerstoffverbrauch direkt umrechenbar.

Über die bisher üblichen Darstellungen des CO_2 -Stoffwechsels im diurnalen Zyklus hinausgehend, werden diese im Parameterraum dargestellt und eingehend diskutiert. Hieraus werden Aussagen über die Stabilität des Gasstoffwechsels als Kriterium der Vitalität bei toxischer Belastung gewonnen. Stabilität des CO_2 -Gaswechsels bedeutet in diesem Sinne, daß auch bei Vorliegen einer toxischen Belastung der photosynthetische Bereich ($A_N > R_N$) in der Tages-Hellphase erreicht, d.h. das Kompensationsniveau ($A_N = R_D$) überschritten wird.

Da der circidiane CO_2 -Umsatz mit dem Sauerstoffumsatz im Gewässer korreliert ist, sind Prognosen der Vitalität untergetaucht lebender Pflanzen für die Prognose des Sauerstoffregimes im Fließgewässer von hoher Bedeutung, falls es sich um solche Fließgewässer handelt, die von Makrophyten in ihrem Stoffhaushalt, wesentlich bestimmt werden.

Gasstoffwechselphysiologische Kriterien weisen eindeutig die unterschiedliche Toxizität gleicher Kupfer- und Zinkionenkonzentrationen aus. Auf dieser Grundlage lassen sich *Rangfolgen toxischer Wirksamkeit* ermitteln, wobei das gasstoffwechselphysiologische Verhalten als hochempfindlicher Indikator erschlossen wird. Damit werden zugleich wissenschaftlich gesicherte ökophysiologische Grundlagen für die Berechenbarkeit des Leistungsanteils submerser Makrophyten in Fließgewässern als hydrischen Ökosystemen zur Verfügung gestellt.

*

*

*

Frau Liselotte Schürmann danken wir für bewährte, umsichtige Mitarbeit.

BADANIA TOKSYKOLOGICZNE ZANURZONYCH MAKROFITÓW Z ZASTOSOWANIEM ANALIZY GAZOWEJ W PODCZERWIENI (METODA IRGA)

Stabilność 24-godzinnego (dobowego) bilansu CO₂, będącego produktem metabolizmu podwodnych makrofitów i oznaczonego w podczerwieni, przyjęto za wskaźnik obciążenia tych organizmów związkami toksycznymi. Doświadczenie przeprowadzono na *Fontinalis antipyretica* L.

Stwierdzono, że w fazie inkubacji i przy obciążeniu cynkiem do 40 mg/dm³ bilans CO₂ jest stabilny, natomiast przy tym samym obciążeniu miedzią (która wywołuje zakłócenia w metabolizmie) w bilansie zachodzą zmiany.

Zaproponowana metoda pozwala określić obciążenia związkami toksycznymi dopuszczalne dla makrofitów. Organizmy te wywierają wyraźny wpływ na przemiany i bilans materiałowy odbiornika. Stąd omawiane badania można wykorzystać do oceny następstw toksycznego obciążenia wód płynących, co jest jednym z ważniejszych problemów ochrony środowiska.

TOXICOLOGIC STUDIES ON INMERSED MACROPHYTES BY IR GAS ANALYSIS (IRGA)

24 hr balance stability of CO₂⁺ (being the product of submerged macrophytes metabolism) determined by IR method has been suggested as a loading criterion of the toxic substances. The experiment has been performed on *Fontinalis antipyretica* L. It has been stated that at the zinc loading not exceeding 40 mg/dm³ the CO₂ balance was stable, its instability being observed at the same concentration of copper (which affects the metabolism). The method suggested allows to determine the threshold concentration of toxic compounds for submerged macrophytes. Since these organisms affect distinctly the material balance in the receiving water body the method can be used to estimate the consequences of the surface water toxic loading. This problem is of much importance in the environment protection area.

ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРУЖЕННЫХ МАКРОФИТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГАЗОВОГО АНАЛИЗА В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ (МЕТОД IRGA)

В качестве показательного критерия токсической нагруженности подводных макрофитов предлагается применять устойчивость (в цикле 24 часов), определяемого в инфракрасной области CO₂, представляющего собой продукт биохимических превращений. опыты проводились на мхе *Fontinalis antipyretica* L.

В фазе инкубации, при нагрузках до 40 мг/дм³ Zn²⁺ система сохраняет устойчивость, присадка же 40 мг/дм³ Cu²⁺ вызывает возмущения в метаболизме и изменения в балансе CO₂. Следовательно, можно установить таким образом предельные значения нагрузок вышших подводных растений, как это показано на примере *Fontinalis*. Макрофиты заметно влияют на превращения и материальный баланс приемника. На основе полученных результатов возможно рассматривать и определять последствия токсической нагруженности проточных вод, представляющей собой одну из проблем охраны природной среды.

LITERATUR

- [1] AUERBACH S., PRÜFER P. und WEISE G., CO₂-Stoffwechsel submerser Wasserpflanzen vom Typ *Fontinalis antipyretica* L bei intermittierender Belichtung, Biol.Zbl. 91: 1972, 463-475.
 [2] GNAUCK A. H., 1974 a: Zur mathematischen Modellierung eines limnischen Ökosysteme, Acta

- hydrochim. hydrobiol. **2**, 6, (im Erscheinen); 1974 b: *Zur mathematischen Modellbildung limnischer Ökosysteme*, **17**, 6, 197–198.
- [3] HORBACH, W., HORNIG L. und WEISE G., *Untersuchungen des CO₂-Stoffwechsels submerser höherer Wasserpflanzen im Fließgewässer unter Einsatz eines fahrbaren Infrarot-Gasanalytator-Labors*, Int.Revue ges. Hydrobiol. **59**, 1974, 1, 17–29.
- [4] KNÖPP, H., *Stoffwechselfynamische Untersuchungsverfahren für die biologische Wasseranalyse*, Int. Revue ges. Hydrobiol. **53**: 1968, 409–441.
- [5] PAVLETIC Z. und LIETH H., *Der Lichtkompensationspunkt einiger immergrüner Pflanzen im Winter und im Frühjahr*, Ber. Dtsch. Bot. Ges. **71**: 1958, 309–314.
- [6] POLSTER H., *Gasstoffwechselphysiologische Untersuchungen an Gehölzen zur Frage der Vitalität der Pflanze*, Sitzungsber. DAL 13, 1964, H. 9.
- [7] PRÜFER P. und AUERBACH S., *Gasstoffwechselphysiologische Untersuchungen an submersen Makrophyten vom Typ Fontinalis antipyretica L im Variationsbereich von Licht, Temperatur, Turbulenz und toxischer Belastung in einem angenäherten Fließgewässermodell*. Diss. TU Dresden 1972.
- [8] UHLMANN D., *Hydrobiologie (Binnengewässer). Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. VEB Gustav-Fischer-Verlag, Jena 1974 (im Erscheinen).