

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 57 (2000)

Artikel: Ökologie des Bielersees
Autor: Tschumi, Pierre-André
Kapitel: 9: Die Messung der Algenproduktion von Seen
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-318631>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

8.4 Der Wirkungsgrad der Primärproduktion

Zur Bildung von 1 Gramm pflanzlicher Biomasse sind 3.74 kcal oder 15,65 kJ erforderlich. Diese Energie stammt von der Sonne, wird von den Pflanzen als Licht aufgefangen und bei der Chlorophyllassimilation in die neugebildete Biomasse eingebaut. Biomasse ist der wichtigste Energieträger für alle Lebensvorgänge der Pflanzen, Tiere und Menschen.

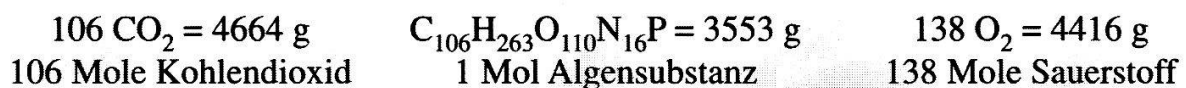
In den 170 Mrd. Tonnen jährlich produzierter Biomasse der Welt sind rund $3 \cdot 10^{18}$ kJ ursprünglicher Sonnenenergie gespeichert. Dies entspricht dem Energiegehalt von 75 Mrd. t Erdöl (jährlicher Verbrauch etwa 3 Mrd. t). Jedes Jahr erreichen etwa $2,7 \cdot 10^{21}$ kJ Sonnenenergie die Erdoberfläche, was dem Energiegehalt von 65 000 Mrd. t Erdöl entspricht. Die von der globalen Nettoproduktion genutzte Sonnenenergie beträgt somit nur 0,1% des die Erdoberfläche erreichenden Sonnenlichtes. Der Wirkungsgrad der Bruttoproduktion liegt bei etwa 0,2%. Davon werden 50% von den Pflanzen gleich wieder veratmet. In Wäldern und Wiesen ist der Wirkungsgrad rund 10mal höher.

9. Die Messung der Algenproduktion von Seen

Die Messung der Algenproduktion eines Sees gibt Auskunft über die Nahrungsressourcen für Fische und ihr Futter, meist Kleinkrebse des tierischen Planktons: In algenarmen und daher wenig produktiven Seen sind die Erträge an planktonfressenden Fischen gering. Ferner dienen Angaben über die Primärproduktion eines Sees der Beurteilung seiner Stoffwechselintensität, das heisst seines Trophiegrades. Die «Gesundheit» eines Sees ist von der Menge der jährlich produzierten Algen abhängig. Bei zu hoher Produktion wird ein See krank (s. 2.4.3).

Im Unterschied zu Landökosystemen können im See die Algenbiomasse und die Primärproduktion nicht durch Ernten und Wägen bestimmt werden. Die Algenbiomasse wird durch Auszählen ermittelt (s. 7.1), die Primärproduktion durch Messung entweder des von den Algen aufgenommenen Kohlenstoffs oder des von ihnen abgegebenen Sauerstoffs.

Gemäss Assimilationsgleichung (6) unter 5.2.4 werden zur Synthese von 3553 g Algenbiomasse 4664 g CO_2 aufgenommen und 4416 g O_2 abgegeben. Die Zahlen entsprechen den Molekulargewichten der 3 Komponenten der Gleichung, wobei 1 Mol = Molekulargewicht in Gramm.



Dies ergibt folgende Verhältnisse:

- Zur Synthese von 1 g Algenbiomasse TS werden 1,31 g CO_2 aufgenommen und 1,24 g O_2 abgegeben.
- Bei der Assimilation von 1 g Kohlenstoff werden 2,8 g Algentrockensubstanz gebildet und 3,47 g Sauerstoff freigesetzt.
- Der Abgabe von 1 g Sauerstoff entspricht die Assimilation von 0,288 g Kohlenstoff.

Aus den Quantitäten des aufgenommenen C oder des abgegebenen O₂ lässt sich die Menge der produzierten Algentrockensubstanz, aus dem abgegebenen O₂ auch die Menge des assimilierten C berechnen. Dementsprechend sind 2 verschiedene Messmethoden gebräuchlich:

9.1 Die C-14-Methode

9.1.1 Prinzip der Methode

Sie wurde 1952 durch STEEMAN-NIELSEN eingeführt [112, 113] und misst den von den Algen aufgenommenen Kohlenstoff (C). Das in der Natur meist verbreitete C-Atom oder C-Isotop besitzt im Kern 6 positiv geladene Protonen und 6 Neutronen ohne elektrische Ladung. Dies ergibt eine Massenzahl von 12. Dieses Isotop wird als ¹²C bezeichnet. Sein Anteil am natürlich vorkommenden Kohlenstoff beträgt 98,89%. Dazu kommt das Isotop ¹³C mit einem Anteil von 1,11%. Beide Formen sind nicht radioaktiv. In aller kleinsten Mengen kommt in der Natur noch ¹⁴C vor. Es bildet sich natürlicherweise in der oberen Atmosphäre beim Zusammentreffen von Stickstoff mit Neutronen aus dem Weltall. Es besitzt im Atomkern 6 Protonen und 8 Neutronen, was eine Massenzahl von 14 ergibt. Es ist radioaktiv und zerfällt unter Abgabe von Elektronen (β-Strahlen) zu Stickstoff, mit einer Halbwertszeit von 5568 Jahren.

Zur Messung des aufgenommenen Kohlenstoffs wird dem natürlich vorkommenden Kohlenstoff angereichertes ¹⁴C zugefügt. Es wird von den Algen ähnlich aufgenommen wie ¹²C und ¹³C. Die Messung der Radioaktivität von neugebildeter Algensubstanz erlaubt die Berechnung der Gesamtmenge des aufgenommenen Kohlenstoffs, wenn im Probenwasser das Verhältnis zwischen ¹²C/¹³C einerseits und ¹⁴C andererseits bekannt ist.

9.2 Die Sauerstoffmethode

9.2.1 Prinzip der Methode

Erste methodische Ansätze finden sich bei GAARDER und GRAN [40], eine genauere Anleitung bei VOLLENWEIDER [134]. Die O₂-Methode wurde von unserer Abteilung übernommen und verbessert [129]. Sie soll weniger empfindlich sein als die ¹⁴C-Methode, liefert aber mehr Information, insbesondere über die Algen-Bruttoproduktion (BP), die Nettoproduktion (NP) der Lebensgemeinschaft und deren Atmung (Respiration, R). Die ¹⁴C-Methode gibt nur Auskunft über die C-Assimilation und liefert wahrscheinlich einen Wert zwischen BP und NP. Die O₂-Methode vermeidet ferner den Umgang mit sehr langlebigen radioaktiven Stoffen.

9.2.2 Ausführung der Messung

Wie bei der ^{14}C -Methode werden mit einer Schöpfflasche aus verschiedenen Tiefen, beispielsweise 0, 1, 2, 3, 4, 5, $7\frac{1}{2}$ und 10 m, Wasserproben erhoben und in Glasflaschen abgefüllt, deren Inhalt auf $\frac{1}{1000}$ ml genau bekannt ist. 2 (oder 3) Flaschen werden sofort mit Winkler-Reagenzien versetzt zur O_2 -Bestimmung zu Versuchsbeginn (0-Flaschen). 2 (oder 3) weitere Flaschen werden verdunkelt, z.B. mit vorgängig angebrachtem schwarzem und zusätzlich weissem Anstrich oder mit gut verschliessbaren schwarzen Plastikhüllen (Dunkel-Flaschen). Die letzten 2 (oder 3) Flaschen werden nicht verdunkelt (Hellflaschen). Die Hell- und Dunkelflaschen werden nach dem Abfüllen unverzüglich, an einer Leine befestigt, in die Entnahmetiefe hinuntergelassen, und die an Schwimmkörpern befestigte Versuchsanordnung wird, Flaschen in horizontaler Lage, während 6 Stunden im See belassen (s. *Abbildung 24*).

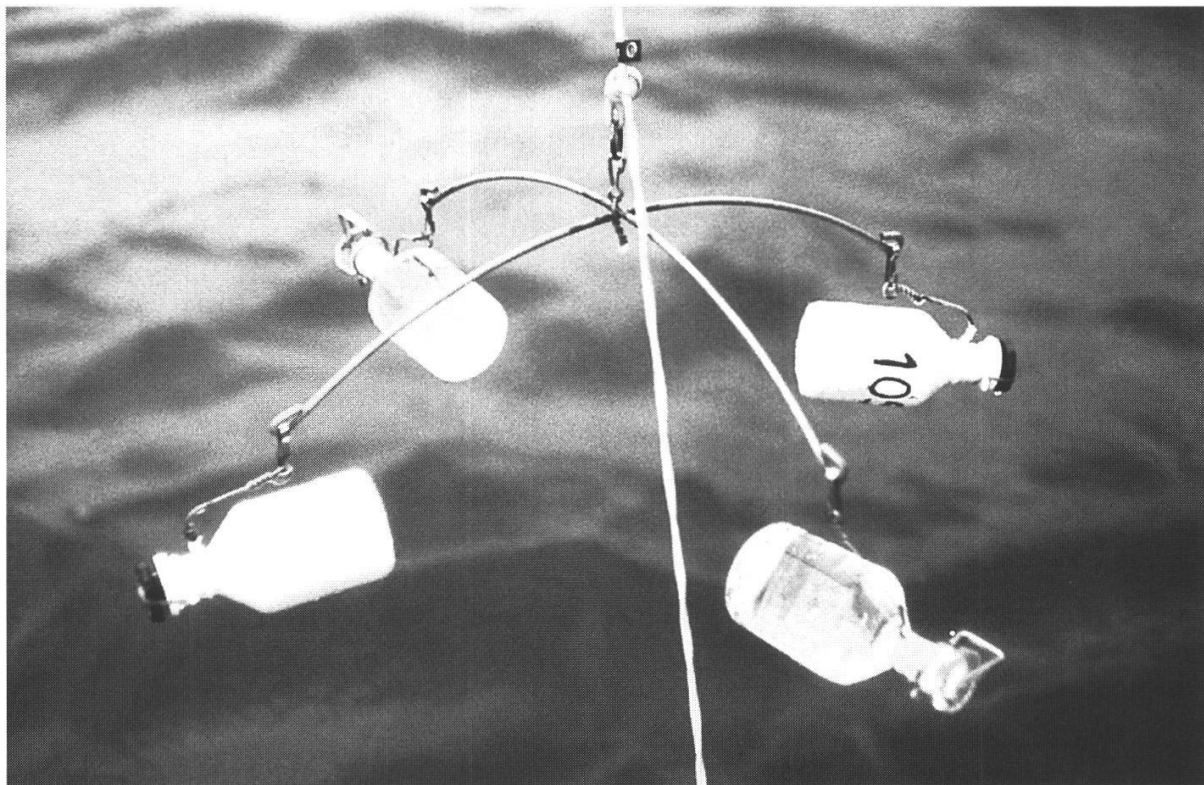


Abbildung 24: Einrichtung zur Messung der Algenproduktion und -atmung mit der Hell-Dunkel-Flaschen-Methode (Sauerstoffmethode). In die unverdunkelten Hellflaschen (links oben und rechts unten) dringt Licht ein. Darin eingeschlossene Algen können Biomasse und Sauerstoff produzieren: Zunahme des O_2 -Gehaltes in den Hellflaschen. In die verdunkelten und zusätzlich weiss angestrichenen Dunkelflaschen (links unten und rechts oben) dringt kein Licht ein. Darin befindliche Algen können weder Biomasse noch O_2 produzieren, wohl aber atmen: Abnahme des O_2 -Gehaltes in den Dunkelflaschen. Je 2 oder 3 Hell- und Dunkelflaschen werden mit einer Leine in die 8 Entnahmetiefen der Wasserproben verbracht und dort während 6 Stunden belassen. Anschliessend wird ihr Sauerstoffgehalt im Labor gemessen. Weitere Erläuterungen unter 9.2.2.

Nach Ablauf der Versuchsdauer werden sämtliche Hell- und Dunkelflaschen heraufgeholt und so rasch wie möglich mit Winkler-Reagenzien (s. 5.1.1) versetzt, was alle biologischen Vorgänge beendet. Im Labor wird der O_2 -Gehalt aller 3 Flaschentypen genau gemessen.

- Die Nullflaschen geben den O_2 -Gehalt des Wassers zu Versuchsbeginn an.
- Die Dunkelflaschen haben am Ende des Versuchs einen tieferen O_2 -Gehalt als die Nullflaschen. Da kein Licht in sie eindringt, wird die Photosynthese durch Algen verunmöglicht, und sie scheiden keinen Sauerstoff aus. Dagegen atmen die Algen und mit ihnen eingeschlossene Zooplankter und Bakterien und verbrauchen O_2 . Die Abnahme des O_2 -Gehaltes in den Nullflaschen gibt die Atmung (Respiration R) der darin eingeschlossenen Lebensgemeinschaft an.
- Die Hellflaschen der oberen Wasserschichten haben am Ende des Versuchs einen höheren O_2 -Gehalt als die Nullflaschen. In ihnen konnten die Algen, dank dem eindringenden Licht, CO_2 assimilieren, Biomasse produzieren und O_2 abgeben. In den Hellflaschen wird aber auch O_2 verbraucht durch Atmung der Algen, der Bakterien und des tierischen Planktons. Die O_2 -Zunahme in den Hellflaschen (= Überschuss der O_2 -Produktion aus Photosynthese gegenüber dem O_2 -Verbrauch durch Atmung) ist ein Mass für die Nettoproduktion (NP) der Lebensgemeinschaft. In Tiefen zwischen 5 und 10 m ist NP oft negativ, vor allem im Sommer, wenn das Licht infolge der Selbstbeschattung der Algen nur wenig tief eindringt. Dann überwiegt die Respiration.
- Durch Addition von R der Dunkelflaschen und NP der Hellflaschen erhält man die Bruttoproduktion (BP) der Algen, das heisst ihre gesamte Primärproduktionsleistung, zunächst ausgedrückt in mg/l O_2 und dann umgerechnet in mg C oder Algen-Trockensubstanz pro Liter, m^3 oder Wassersäule unter dem m^2 Seeoberfläche.

9.2.3 Die Präzision der Sauerstoffmethode

Die gemessenen O_2 -Gehalte von Proben, die mit derselben Schöpfflasche aus derselben Tiefe gewonnen wurden, können aus methodischen Gründen leicht voneinander abweichen: sie streuen. Die Berechnung des Mittelwertes von 2 oder besser noch 3 Parallelproben erhöht die Messgenauigkeit. Diese ist gleich der aus den Einzelmessungen berechneten Standardabweichung, einem statistischen Streuungsmass. Mehr als 3 parallele Proben je Produktivitätsversuch (72 zu titrierende Flaschen) sind vom Aufwand her nur noch schwer zu bewältigen. 3 Parallelfaschen (3 Null-, 3 Hell- und 3 Dunkelflaschen pro Tiefe) ergeben gute Präzision und erlauben zudem, einen Wert, der von den 2 andern stark abweicht, mit einem statistischen Verfahren als «Ausreisser» zu eliminieren.

Die Differenz zwischen Null- und Hellflaschen sowie zwischen Null- und Dunkelflaschen sollte statistisch signifikant sein. Dies lässt sich mit einem Test (t-Test) prüfen, welcher nur möglich ist, wenn Mittelwerte von mindestens je 2 oder besser noch je 3 Einzelwerten miteinander verglichen werden.

Als wir unsere Untersuchungen aufnahmen, war gemäss Literaturangaben die Präzision der O₂-Methode bestenfalls 0,05 mg/l O₂. Uns genügte diese Empfindlichkeit nicht, vor allem im Winter, wenn die Algen sehr wenig produzieren. Meinem damaligen Laboranten JAKOB ZBÄREN, gelang es, mit einem selbst konstruierten Phototitrator die Genauigkeit der O₂-Messung wesentlich zu verbessern. Mit diesem Gerät wird der Titrationsendpunkt der O₂-Messung, das heisst der Farbumschlag von violett zu farblos, nicht mehr von Auge, sondern photometrisch bestimmt. Dank dessen und weiteren Verfeinerungen aller Handhabungen konnten wir die Präzision der Winkler-Methode zur Bestimmung des im Wasser gelösten Sauerstoffs auf mindestens 0,005 mg/l O₂ unter Feldbedingungen erhöhen. Damit wurde die kleinste noch signifikante Differenz zwischen 3 Mittelwerten aus je 3 Einzelmessungen (z.B. zwischen 3 Hell- und 3 Dunkelflaschen) von 0,05 auf 0,01 mg/l O₂ erniedrigt. Die Präzision der O₂-Methode zur Messung der Algenproduktion wurde so 5mal erhöht. Die O₂-Methode wurde damit konkurrenzfähig zur ¹⁴C-Methode [96, 129]. In der Folge wurde die O₂-Messung durch meinen Laboranten EDI JUTZI automatisiert.

10. Die Produktion von Algen im Bielersee

Unsere Messungen sollen exemplarisch an 2 Versuchen mit ganz unterschiedlicher Zielsetzung veranschaulicht werden:

10.1 Erklärung des Klarwasserstadiums

10.1.1 Ziel und Hauptergebnis des Versuchs vom 25. Juli 1978

Er ist eine der 24 Messreihen des Jahres 1978, welche zwischen dem 14. März und dem 6. Dezember durchgeführt wurden, zusammen mit Erhebungen über das tierische Plankton sowie dessen Produktivität und Frassleistung. Ziel dieser Arbeit, an der sich BRUNO BANGERTER, ELISABETH BÖHLEN und HEIDI FANKHAUSER [8] beteiligten, war eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen Algen und Zooplankton beim Zustandekommen des Klarwasserstadiums oder Junilochs (s. 7.2.4, 10.1.1, ferner 12.3.2.2, 12.4).

Das Hauptergebnis war, dass für das Juniloch das Krebsplankton verantwortlich ist, 1978 vor allem die Rüsseltierchen *Bosmina* (*Tafel 5/5*) und die Wasserflöhe *Daphnia* (*Tafel 5/4*), welche im Juni Bestandeszahlen von über 2 Mio. Individuen unter dem m² Seefläche erreichten. Beide ernähren sich von Algen. Beim Erreichen ihrer höchsten Bestandesdichten frassen sie mehr Algensubstanz als produziert wurde. Deshalb nahmen die Algendichte und die Chlorophyllkonzentration stark ab (s. *Tabelle 8*). Dies führte zum Klarwasserstadium mit hoher Sichttiefe. Nach dem Zusammenbruch der Algenpopulation nahmen die Bestände von *Bosmina* und *Daphnia* ihrerseits rasch ab auf rund 0,5 Mio./m², wohl infolge Nahrungsmangel nach Übernutzung ihrer Nahrungsgrundlage.